



**Tratamiento de purines caprinos
mediante un humedal artificial con
aireación forzada.**

**Goat slurry treatment using artificial
wetlands with forced aeration.**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA
Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

Presentado por:

D./D^a PAOLA ANDREA CUCUNUBÁ MORENO

Dirigido por:

D. LUIS FELIPE FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ

D. FRANCISCO CARREÑO CONDE

Alcalá de Henares, a 6 de junio de 2022

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto es fruto de múltiples esfuerzos y apoyo, una demostración de que constancia y motivación se logran grandes cosas.

Agradecer a mi familia que han sido un apoyo increíble a la distancia, que me han inculcado estudiar y dar lo mejor de mí siempre.

A mi Ziquillo y su familia quienes han hecho de España un segundo hogar y me han apoyado y ayudado en todo lo posible para culminar con éxito esta etapa.

Al apoyo de Silvia Ruiz por su amabilidad, paciencia y disponibilidad ante mis dudas, sin ella no hubiera sido posible este proyecto.

A Luis Felipe Fernández y Ecolagunas por compartir su conocimiento, por su supervisión y orientación en el desarrollo de este trabajo.

AECID quien vio mi potencial y me brindo la oportunidad de cursar este Master.

"Si hay magia en este planeta, está contenida en el agua."

- Loran Eisely.

ÍNDICE

RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
1. OBJETIVOS	10
2. METODOLOGÍA	11
3. ANTECEDENTES	11
3.1. Legislación del tratamiento de aguas residuales en España.....	12
3.2. Métodos de tratamiento de aguas residuales.....	13
3.3. Sistemas de tratamiento más empleados para la depuración de purines. 15	
3.3.1. Reactor Biológico UASB	15
3.3.2. Lodos activados.....	17
3.3.3. Contactores biológicos giratorios.....	19
3.3.4. Lagunas de estabilización	21
3.3.5. Humedales artificiales.....	22
3.3.5.1. Humedales Artificiales de Flujo Superficial (HAFS)	24
3.3.5.2. Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSs)	25
4. RESULTADOS.....	28
4.1. Descripción del caso aplicado.....	28
4.2. Zona de estudio	28
4.3. Sistema de depuración actual y caracterización del afluente.....	31
5. DISCUSIÓN	32
5.1. Sistema complementario propuesto.....	33
5.1.1. Principios del funcionamiento humedal artificial con aireación forzada 33	
5.1.2. Características del diseño	35

5.1.2.1.	Consideraciones generales.....	35
5.1.2.2.	Materiales y componentes del sistema	36
5.1.2.3.	Diseño y Dimensiones	36
5.1.2.4.	Vegetación del humedal.....	38
5.1.2.5.	Cálculo de remociones esperadas	39
5.1.2.6.	Análisis económico	40
6.	CONCLUSIONES	45
7.	BIBLIOGRAFÍA	47
8.	ANEXOS	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de Reactor UASB. Fuente (Arango Bedoya & Sanches, 2009)	16
Figura 2. Esquema de sistema de lodos activados. Fuente (Iagua, 2022)	18
Figura 3. Esquema de Biodiscos. Fuente: (Castillo, Vergara, & Moreno, 2007)	19
Figura 4. Esquema del sistema de depuración mediante lagunaje. Fuente: (Diputación de Palencia, 2007)	22
Figura 5. Clasificación de los humedales artificiales. fuente (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)	23
Figura 6. Corte transversal de un Humedal Artificial de Flujo Superficial. Fuente: (García Serrano & Corzo Hernández, 2008)	25
Figura 7. Corte transversal de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal. Fuente: (García Serrano & Corzo Hernández, 2008)	25
Figura 8. Corte transversal de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical. Fuente: (García Serrano & Corzo Hernández, 2008)	26
Figura 9. Logo Cantero de Letur	28
Figura 10. Localización Municipio de Letur- Albacete.	29
Figura 11. Localización Granja Cantero de Letur	30
Figura 12. Mapa Geológico. Fuente (IGME)	30
Figura 13. Esquema de funcionamiento Humedal artificial con aireación forzada. fuente ((ArmgroupLtd, 2022)	33
Figura 14. Comparativa de tasas de transferencia de oxígeno en HA fuente (ArmgroupLtd, 2022)	34
Figura 15. Vista en planta dimensiones de humedal. (Ecolagunas.2022)	37
Figura 16. Costes de explotación y mantenimiento por tipología de EDAR (€/h-e. año). Fuente (Torres, y otros, 2013) modificado por Ecolagunas	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores promedios aproximados de producción de Purín y la relación C/N	9
Tabla 2. Parámetros del vertimiento sistema actual.....	32
Tabla 3. Dimensiones humedal Artificial FBA.....	37
Tabla 4. Parámetros de vertimiento estimados del HA	39
Tabla 5. Concentraciones máximas permitidas según RD 509/1996	39
Tabla 6. Presupuesto de emplazamiento del HA FBA TM	40
Tabla 7. Costo Anual Equivalente (CAE)	41

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Sistema de tratamiento actual por aireación prolongada	31
Fotografía 2. Typha Latifolia. Fuente (ATSA)	38

TABLA DE ABREVIATURAS

CAE: Costo Anual Equivalente

CEE: Comunidad Económica Europea

CITEEC: Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil

CNAE: Clasificación Nacional de Actividades Económicas

DBO: Demanda biológica de oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

FBA TM: Forced Bed Aeration

HA: Humedales artificiales

Hab-Eq: Habitantes equivalente

HAFS: Humedales Artificiales de Flujo Superficial

HAFSs: Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial

HAFSsv: Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical

HAFSsh: Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal

IGME: Instituto Geológico y minero de España

L: Litro

mg: Miligramos

PVC: Policloruro de vinilo

RD: Real Decreto

SS: Sólidos Suspendidos

UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor

RESUMEN

La generación de residuos de origen ganadero representa una de las mayores fuentes de desechos y de potencial contaminante en Europa, entre los desechos podemos destacar los purines que se encuentran compuestos por deyecciones animales (estiércol y orina) y una proporción de agua procedente de la limpieza y escape de los bebederos, se caracteriza por contener una elevada proporción líquida y poca sustancia seca; su inadecuada gestión representa graves problemas ambientales como: la contaminación del suelo, de las aguas superficiales y subterráneas, la generación de malos olores y presencia de vectores.

Por lo cual se hace indispensable como cumplimiento a la normativa europea y española el tratamiento de estos vertidos y la eliminación de los contaminantes con el fin de general el menor impacto posible sobre el medio receptor.

Para el tratamiento de los vertidos provenientes de estas granjas se han implementados diversos sistemas y las tecnologías más empleadas como tratamiento biológico o secundario son: reactores biológicos UASB, lodos activados, contactores giratorios, Lagunas de estabilización y Humedales artificiales con sus respectivas ventajas y desventajas las cuales se resumen en el presente trabajo.

Se analizará como caso práctico la implementación de un humedal artificiales de Aireación forzada (FBA TM) para la empresa Cantero de Letur que es una granja agroecológica de producción de alimentos lácteos, el sistema se implantará para la sección caprina para una población de 3000 cabras (50 hab-eq) y un caudal a tratar de 12 m³/día, describiendo sus características de diseño y consideraciones técnicas para su correcta aplicación.

INTRODUCCIÓN

La producción de lácteos provenientes de caprinos representa una importante actividad económica para España; el valor de la producción de leche de cabra alcanzó la suma de 358 millones de euros para el año 2020 lo cual representa un 18% de la producción final de ovino y caprino entre leche y carne. Con un total de 1.233.681 cabras de ordeno para el año 2020. (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2021).

El sector agropecuario se caracteriza por ser una de las mayores fuentes de desechos y que cuenta con un alto potencial contaminante en Europa, y entre los que se destacan los residuos ganaderos debido a que representan una de las principales problemáticas ambientales en la actualidad. (Burton & Turner, 2003).

Los residuos ganaderos se pueden clasificar en dos clases. La primera conocida como “fiemos” es aquella que tiene un sustrato orgánico importante, pues se ha generado añadiendo paja o camas similares, cuyo propósito es que absorban las deyecciones. Y los segundos conocidos como los “Purines” estiércol fluido o líquido que se introdujo con la evacuación hidráulica de las deyecciones, está compuesto por las deposiciones (orina y estiércol) y se adiciona una determinada cantidad de agua (limpieza, escape de bebederos), por lo cual debido a sus características propias que tiene muy poca sustancia seca y una elevada proporción de agua. (Orús, Quílez, & Beltrán, 2000)

En la gestión de los purines es ampliamente conocida la problemática de los malos olores y la emisión de los gases de efecto invernadero, así como el vertido de los excedentes de purines, los cuales dan origen a graves problemáticas ambientales entre lo que se destacan la contaminación del suelo, de las aguas superficiales y subterráneas. Adicionalmente con la tecnificación de las granjas intensivas se han incorporados sistemas de limpieza que emplean el agua a presión como mecanismo para arrastrar los purines a canales de evacuación. (Muelas Ramos, 2017).

Durante varias décadas se han empleado los residuos procedentes de la ganadería como abono con el fin de mejorar las propiedades químicas del suelo aumentando su disponibilidad de nutrientes; pero teniendo en cuenta que se ha presentado un notable aumento en el número de explotaciones ganaderas intensivas y sumado con la alta capacidad de contaminación de los purines, su uso desmedido y descontrolado ha generado importantes problemas medio ambientales. (Blanco, 2016)

Las granjas extensivas de basan en la industrialización de su sistema de explotación, aprovechando al máximo el terreno disponible e intensificando la producción, empleando la tecnificación para aspectos como la alimentación, la reproducción y el aprovechamiento, de esta manera poder tener mayor número de animales en un menor espacio.

En cuanto a las emisiones, se estima que en el sector agrícola los rumiantes de pequeño porte representan cerca del 6,5 % de las emisiones globales pertenecientes al sector lo cual equivale a 475 millones de toneladas de Co₂-eq de y de estos 299 millones de toneladas corresponden a la producción de carne y 130 millones de toneladas a la producción de leche y los 46 millones restantes a otros bienes y servicios. (Gerber, y otros, 2013).

La composición del purín, en general, varía de unas granjas a otras, por lo que es difícil fijar a nivel general tanto la cantidad que se produce como la composición de este, entre los factores que influyen se puede destacar: el tipo de ganado (especie), la alimentación y dieta, condiciones ambientales (estación del año y pluviosidad), duración y condiciones de almacenamiento. (Marañón Maison, y otros, 1998).

Tabla 1. Valores promedios aproximados de producción de Purín y la relación C/N

Purines	Producción de Kg/día	%C	%N	Relación C/N
Bovinos	10	30	1.2	25:1
Ovinos	1.5	35	1	35:1

Porcinos	2.25	25	1.5	16:1
Caprinos	2.0	40	1	40:1
Conejos	0.35	35	1.5	23:1
Gallinas	0.18	35	1.5	23:1
Excretas Humanas	0.4	2.5	0.85	3:1

Fuente: Adaptado (Vernero & Arellano, 1990)

La ausencia histórica de normativa al respecto y el inadecuado y/o insuficiente tratamiento de estos purines representa una contaminación significativa de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, de allí surge la necesidad de implementar sistemas cada vez más eficientes y con altos niveles de remoción pero que a su vez sean rentables económicamente tanto en su implementación como en su mantenimiento.

Durante varias décadas se han implementados diversos sistemas para el tratamiento de los residuos provenientes de estas granjas, las tecnologías más empleadas como tratamiento biológico o secundario son: reactores biológicos UASB, lodos activados, contactores giratorios, Lagunas de estabilización y Humedales artificiales.

La empresa Cantero de Letur una granja agroecológica de producción de alimentos lácteos, se encuentra en proceso de implementar medidas de tratamiento de vertidos orientados a su política y principios de conservación y armonía con la naturaleza incorporando tratamientos no convencionales como lo es los humedales artificiales de Aireación forzada (FBA™)

1. OBJETIVOS

General

Describir las características del sistema de depuración para el tratamiento de purines caprinos empleando un humedal artificial con aireación forzada.

Específicos

- Realizar una comparación general entre los sistemas de depuración más empleados para el tratamiento de purines.
- Especificar las características de diseño y funcionamiento de un humedal artificial con aireación forzada para el tratamiento de purines.
- Demostrar los beneficios y ventajas de implementar un sistema de humedal artificial en comparación con los sistemas de depuración convencionales.

2. METODOLOGÍA

El presente Trabajo Final de Master se desarrolla en dos fases.

La primera consiste en una búsqueda de información académica y de antecedentes sobre los sistemas de tratamiento de aguas residuales más empleados, desarrollando una comparativa con sus ventajas y desventajas; para lo cual se empleó la bibliografía asociada y se utilizaron las siguientes bases de datos:

- Scielo
- Sciencedirect
- Redalyc
- Dialnet
- Google Scholar

La segunda fase consiste en la descripción de un caso práctico para la implementación de un humedal artificial de flujo forzado para el tratamiento de aguas residuales de una granja agroecológica de explotación caprina para productos lácteos, en donde se describe su localización, diseño y características de funcionamiento, para lo cual se empleó la información suministrada por las empresas Ecolagunas encargada de la construcción del humedal y Cantero de Letur. Lugar donde se implementará el proyecto.

3. ANTECEDENTES

3.1. Legislación del tratamiento de aguas residuales en España

El tratamiento de aguas residuales se ha incorporado con notoria importancia a partir de la aprobación de la Ley de aguas 29/1985 del 2 de agosto por medio de la cual se implementa la autorización de vertido. Mediante la Directiva 91/271 CEE del 31 de diciembre del 2000 se establece la depuración obligatoria de aguas antes del vertido para núcleos urbanos con una población mayor a 15.000 habitantes y para núcleos entre 2.000 y 15.000 habitantes se establece como fecha límite 31 de diciembre de 2005.

Como eje central y rector se establece la Directiva Marco del Agua 2000/60/CEE, que tiene como objetivo reducir las presiones sobre las masas de agua y la protección de estas para alcanzar el buen estado ecológico de las mismas

Mediante la Directiva 91/271/CEE se definen y diferencia entre aguas residuales urbanas y aguas residuales industriales.

De acuerdo con el Real Decreto-Ley 11/1995 del 28 de diciembre se definen las aguas residuales industriales como: "todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial." Y mediante el cual se establecen las normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas.

En la Ley 5/2002, del 3 de junio por medio de la cual se dan especificaciones sobre vertidos de aguas residuales industriales a los sistemas públicos se definen las aguas residuales industriales como: "las procedentes de los procesos propios de la actividad en instalaciones comerciales o industriales con presencia de sustancias disueltas o en suspensión"

De acuerdo con el RD 606/ 2003 del 23 de mayo las aguas residuales generadas en los procesos agropecuarios son catalogadas como una actividad industrial de clase 3 grupo 17 (zootécnica), al ser de clase 3 se le asignan los coeficientes de mayoración más altos debido a las características propias de este tipo de vertidos: altos contenidos de materia orgánica, nitratos, fosforo.

Por lo cual es necesario de acuerdo con la normativa realizar un tratamiento adecuado para garantizar los parámetros de vertido autorizados establecidos en la RD 509/1996 anexo I.

3.2. Métodos de tratamiento de aguas residuales

El objetivo fundamental de los tratamientos de aguas residuales es generar un efluente con las características óptimas para ser vertido sin causar daños al medio ambiente, los tratamientos se pueden clasificar según su principio de funcionamiento en: físicos, químicos y biológicos.

Según (Moeller & Tomasini, 2004). Se pueden describir de la siguiente manera

- Métodos físicos: En donde se aplican fuerzas físicas, las más comunes son cribado, mezclado, adsorción, desorción, flotación, sedimentación y filtración.
- Métodos químicos: la remoción de contaminantes se realiza adicionando reactivos que provocan diferentes reacciones químicas, los más empleados son la precipitación química, coagulación, desinfección y corrección de pH.
- Métodos biológicos: la eliminación de contaminantes se realiza mediante la oxidación biológica de la materia orgánica. Es muy empleado para la remoción de compuestos orgánicos biodegradables.

Por lo general en el tratamiento de aguas residuales se aplican uno o varios métodos para la remoción de los contaminantes de acuerdo con las características propias del vertido y dividiéndolo en etapas de tratamiento que se clasifica en : primario, secundario y terciario y/o avanzado.

Los cuales describen (Moeller & Tomasini, 2004) como:

- Primario: Consiste principalmente en la eliminación de sólidos y se emplean procesos físicos.

- Secundario: Se basa en la remoción de materia orgánica residual y suspendida, por lo general se emplean procesos biológicos
- Terciario: este se aplica principalmente cuando el agua será reutilizada o se deben remover contaminantes específicos que no se pueden remover mediante tratamientos convencionales, se emplean procesos químicos y físicos avanzados.

El presente trabajo se enfoca principalmente en los tratamientos de carácter secundario-biológico, en donde intervienen diferentes microorganismos. Cuyo objetivo fundamental es el remover los sólidos coloidales no sedimentables y los sólidos disueltos para así reducir los niveles de materia orgánica y de nutrientes como nitrógeno y fósforo presentes en el agua. (Moeller & Tomasini, 2004)

Los tratamientos de carácter biológico pueden clasificarse en dos grandes grupos de acuerdo con el metabolismo de los microorganismos: anaerobios o aerobios.

- **Aerobios**: La materia orgánica y su descomposición se divide en tres fases: la primera la hidrólisis de moléculas orgánicas complejas en sus respectivos monómeros, posteriormente la descomposición de estos monómeros en partículas comunes y finalmente el ciclo de Krebs y la cadena respiratoria, en la cual el oxígeno molecular se convierte en el aceptor final de electrones, y como producto final se obtiene, dióxido de carbono, amoníaco y agua.” (Moeller & Tomasini, 2004).

Las tecnologías de tratamiento de aguas residuales de tipo aerobio son las más aplicadas comúnmente y presenta altas tasas de eficiencia y remoción per con una importante generación de fangos; algunas de las más comunes son: lagunas de oxidación (tipo extensivo), lodos activados (biomasa en suspensión), filtros percoladores y Biodiscos (Procesos de biopelículas).

- **Anaerobios**: La materia orgánica se logra su degradación debido a la ausencia de oxígeno, En este proceso lo compuestos orgánicos generados de la descomposición de la materia orgánica como los sulfatos, nitritos, nitratos y dióxido de carbono se emplean como aceptores finales de

electrones, tenido como principal ventaja la producción de biogás (metano) y la baja generación de lodos. (Moeller & Tomasini, 2004)

3.3. Sistemas de tratamiento más empleados para la depuración de purines.

3.3.1. Reactor Biológico UASB

Es reactor de tipo anaerobio, muy empleado en el tratamiento de aguas residuales sus siglas UASB cuyo término se debe a su nombre en inglés (“upflow anaerobic sludge blanket reactor”) (Ramalho, 1996). Y por su nombre en español se conoce como RAFA (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente) el cual es tipo de biorreactor tubular, que se caracteriza por operar en flujo de carácter ascendente y en régimen continuo, lo que significa que el afluente ingresa por la base del reactor y sale por la parte superior. (Malaspina, Cellamare, Stante, & Tilche, 1996)

El reactor UASB está compuesto en 3 zonas como se puede observar en Figura 1 y de acuerdo a como lo describe (CASSEEB, 1995)

- Zona de entrada: En esta zona el efluente a tratar se distribuye uniformemente en la base o fondo del reactor y es dirigido ascendentemente a la zona de digestión.
- Zona de digestión: En esta zona el efluente debe atravesar un lecho de bacterias anaerobias en donde se degradan los contaminantes por acciones metabólicas de las bacterias(procesos metalogénicos) son transformados en gas.
- Zona de sedimentación: Esta zona de ubica en la parte superior del reactor, y es en donde ocurre la separación del gas, sólido y líquido.

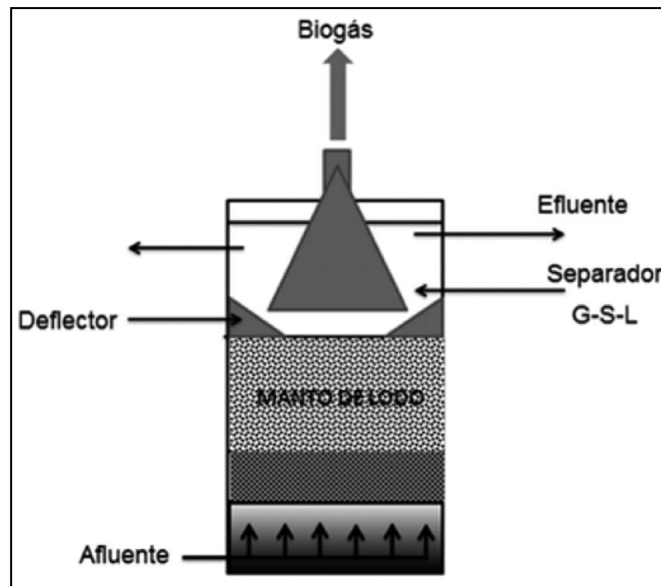


Figura 1. Esquema de Reactor UASB. Fuente (Arango Bedoya & Sanches, 2009)

Ventajas

Algunas de las ventajas que destaca (Ramalho, 1996) son :

- El coste de inversión es bajo.
- Las cargas de diseño de 10 Kg DQO/m³*d o más altas pueden ser empleadas; por lo cual los reactores tienen un volumen pequeño.
- La fermentación ácida y metalogénica, y la sedimentación se realizan en el mismo tanque. Lo que genera que este tipo de plantas sean muy compactas y brinden una economía en el espacio que requieren para su instalación.
- Al no tener relleno, no se presenta la posibilidad de obstrucciones del lecho ni de corto circuito.
- El sistema no requiere de agitación o mezcla mecánica por lo cual su consumo energético es bajo.
- Valorización energética mediante la generación de metano, gas combustible los cuales pueden ser empleados como fuente de energía.
- No es necesario el reciclaje de lodos dado que el sistema presenta una muy buena retención de biomas.
- Tiene una elevada concentración de biomasa. Lo cual le otorga al sistema una alta resistencia a la presencia de sustancias tóxicas y a las fluctuaciones de carga.

Desventajas

Según (Seghezzeo, Zeeman, Van Lier, Hamelers, & Lettinga, 1998) las principales desventajas son :

- No es tan efectivo para un tratamiento secundario completo, debido a que su remoción se enfoca preferentemente en compuestos de tipo orgánicos y sólidos suspendidos. Por lo cual es necesario un postratamiento para eliminar en grados más altos la materia orgánica soluble.
- Tiene una eliminación parcial de patógenos , exceptuando la eliminación de huevos de helmintos los cuales se capturan de manera efectiva en el lecho del lodo.
- Arranque lento, estimado en 8 meses y el sistema debe contar con el inocuo adecuado.
- Es sensible a la temperatura como todo proceso de tipo biológico, sensible a agua residuales que presenten temperaturas inferiores a 16°C y a cambios bruscos de pH fuera del intervalo de 6.5 a 7.5.
- Presencia de malos olores debido al escape de gases el cual se genera principalmente por fallos en la ventilación o por sobrecarga del sistema.

3.3.2. Lodos activados

En un tratamiento biológico aerobio de biomasa en suspensión, que oxida la materia orgánica a dióxido de carbono, agua, amonio y nuevas células (biomasa). (Peña Casanova, 2012) Es un sistema de mezcla completa. Su nombre se deriva de la producción de una masa activa de microorganismos con la capacidad de estabilizar residuos en un medio aerobio, el cual se consigue mediante el uso de aireadores mecánicos, que también se emplean para mantener el líquido en mezcla. Luego de un tiempo la mezcla de las nuevas células con las antiguas se conduce a un tanque de sedimentación en donde se separa el agua residual tratada de las células sedimentadas (Méndez, Miyashiro, Rojas, Cotrado, & Carrasco, 2004).

Un sistema de lodos activados Figura 2, la primera parte del proceso está compuesto por un reactor o tanque de aireación en donde los microorganismos se mantienen en suspensión y aireados mediante una fuente de aireación que

transfiere oxígeno al sistema, se emplean sopladores con difusores, aireación mecánica o la inyección de oxígeno puro también llamado criogénico. La segunda parte del sistema es un proceso de separación de sólidos o tanque de sedimentación para separar los sólidos del agua tratada, cuenta con un sistema de tuberías y bomba que se emplean para recircular los sólidos biológicos y la tubería de desecho de los lodos excedentes (purga de lodos).

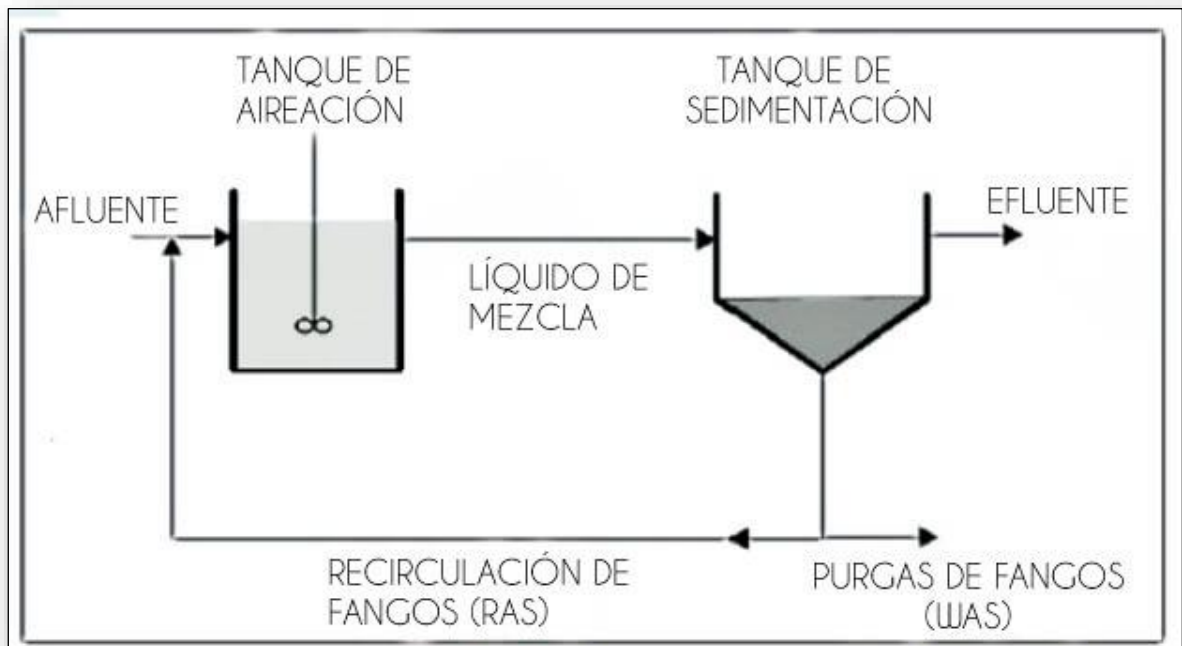


Figura 2. Esquema de sistema de lodos activados. Fuente (Iagua, 2022)

Sus ventajas y desventajas principales son descritas por (Arcos Serrano & Fernández Villagómez, 1993) y son las siguientes:

Ventajas

- Es un sistema robusto que puede tolerar cargas orgánicas altas
- El tanque de mezcla completa cumple un papel amortiguados y dilusor de cargas altas.
- Es una tecnología versátil y difundida mundialmente
- Simplicidad operativa
- Flexibilidad para el tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales

Desventajas

- Elevados costos de operación y mantenimiento.
- Alto consumos energéticos por la oxigenación constante.
- Es un sistema sensible a vertidos con altas cargas de solidos suspendidos y metales.
- Genera grandes volúmenes de lodo

3.3.3. Contactores biológicos giratorios

El reactor de Biodiscos (Rotating Biological Contactor o RBC por sus siglas en ingles). Como su nombre lo indica es un tratamiento de tipo biológico aerobio que se basa en el crecimiento adherido y empleado para la depuración de aguas residuales, el cual consiste en la oxidación de compuestos orgánicos de carácter carbonáceos y amoniacal. (Pérez Aristizabal, 2010).

Este sistema está constituido por unos tambores que están formados por unos ejes con discos que giran sobre los que crece una capa biológica, que es la encargada de oxidar la materia orgánica, al girar los discos, se produce una transferencia de oxígeno que airea el tanque y facilita la oxidación biológica de la materia orgánica. (Lex Nova, 2008)

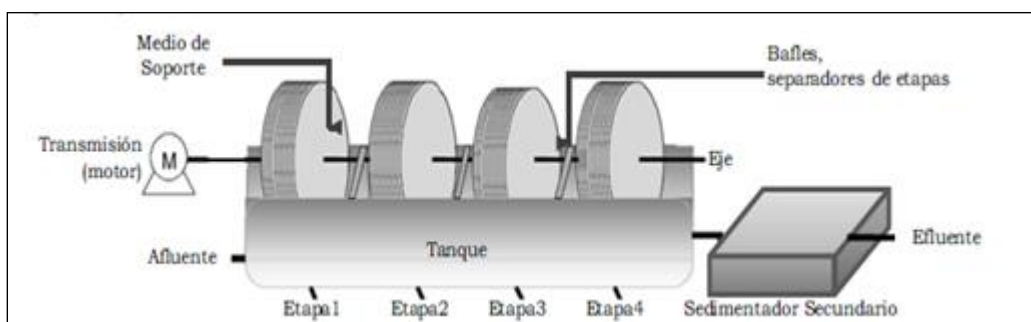


Figura 3. Esquema de Biodiscos. Fuente: (Castillo, Vergara, & Moreno, 2007)

Según la aplicación los discos pueden estar sumergido en un rango ente el 40 a 90% en el agua a tratar. En el cual se desarrolla una película de microorganismos sobre el material plástico, cuyo espesor se autorregula por el rozamiento con el

agua (Rigola Lapeña, 1989)

Ventajas

- Elevada remoción de compuestos orgánicos de tipo carbonáceos y nitrógeno amoniacal (Álvarez & Suárez, 2006)
- Resistencia a las variaciones de pH sin generar deterioros su funcionamiento ((Borzacconi & López, 1996)
- Eficiencia en la remoción de metales pesados, se ha evidenciado que puede eliminar significativamente partículas de Cobre, Cadmio y Zinc (Costley & Wallis, 2000)
- Lodos con alta sedimentabilidad. (Borzacconi et al, 1996; Álvarez y Suárez, 2006)
- Poco requerimiento de área de terreno debido a que tiene tiempos cortos de retención hidráulica.
- Mínimo nivel de ruido (Welter, Romero, Grumelli, Sanchez , & Ascar , 2004)
- Bajo consumo de energía en comparación con los demás sistemas aerobios.
- Resistencia frente a variaciones de cargas hidráulicas y orgánicas.
- Su construcción es de tipo modular, lo cual facilita su emplazamiento.
- Por lo general no se presenta recirculación de efluentes ni de lodos.
- Es de simple operación y requiere un mantenimiento es mínimo.

Desventajas

- Se pueden presentar fallas mecánicas en los discos, ejes y motores.
- Puede tener fugas de lubricantes debido a patrones de diseño muy disímiles. (Romero, 2008)
- La fabricación del material de soporte es complicada debido a su baja comercialización, lo cual aumenta los costos de inversión inicial. (Ministerio del Medio Ambiente, 2002)
- Es inviable económicamente en caudales altos debido a que sus costos de implementación son de tipo lineal en relación al cauda a tratar.
- Los discos son sensibles y se pueden deteriorar por factores como la exposición al calor, a solventes orgánicos o la radiación ultravioleta.

- Generación de olores debido a sobrecargas en la primera etapa del reactor (Alves, 2007)

3.3.4. Lagunas de estabilización

Es uno de los métodos más simple de tratamiento para el agua residual. Estas construidas por excavaciones de poca profundidad y se encuentran cercadas por taludes. Se caracteriza por ser una estructura de carácter simple diseñada para embalsar agua residual. De acuerdo con su principio de funcionamiento pueden clasificarse en, facultativas, aerobias y anaerobias. El tratamiento generalmente se realiza en serie en donde el agua residual va pasando por diferentes lagunas impermeabilizadas. Habitualmente se disponen tres lagunas.

Anaerobias: son lagunas con elevada carga orgánica y gran profundidad con ausencia de oxígeno en donde la materia orgánica se decanta y se empieza a degradar por acción de las bacterias anaerobias. (Diputación de Palencia, 2007)

Facultativas: Son lagunas de menor profundidad, se caracterizan por tener una parte aerobia (en la superficie) y una anaerobia (en el fondo) en donde interactúan una diversidad microorganismos: aerobios estrictos, facultativos, anaerobios. (Arana Ysa, 2009).

Aerobias o de maduración: Son las de menor profundidad de las tres, lo que permite una amplia radiación solar idónea para la eliminación de patógenos por acción por de la radiación ultravioleta y la oxigenación del agua.

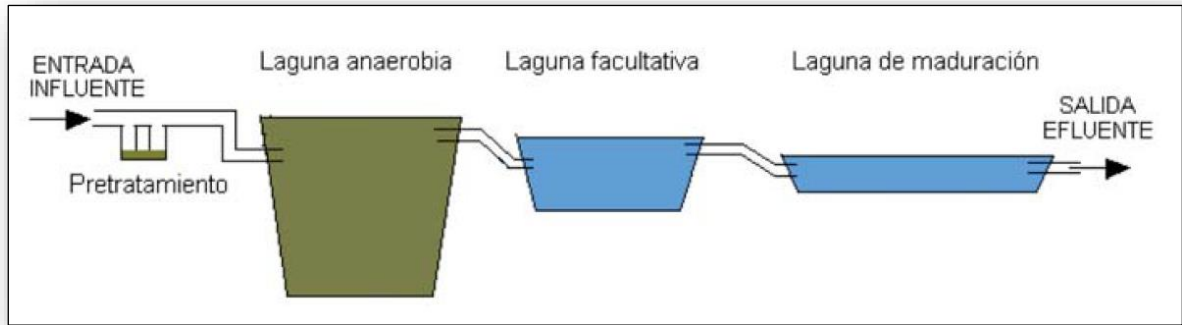


Figura 4. Esquema del sistema de depuración mediante lagunaje. Fuente: (Diputación de Palencia, 2007)

Ventajas

- Bajo costo en obra civil
- Nulo consumo energético en su operación.
- Simple construcción y operación.
- Capaces de amortiguar variaciones bruscas de carga.

Desventajas

- Presenta altos requisitos de terreno para su instalación.
- Limitación en el funcionamiento en zonas con bajas temperaturas o de baja radiación solar.
- Generación de olores por procesos anaerobios
- Pérdida de agua por acción de la evaporación
- Presenta altas concentraciones de sólidos en suspensión en la salida de las lagunas.
- Generación de grandes volúmenes de lodos.

3.3.5. Humedales artificiales

Los Humedales Artificiales (HA) son definidos como sistemas que buscan simular una zona de transición entre un medio terrestre y uno acuático, y se construyen exclusivamente para el tratamiento de aguas residuales buscando unas características y controladas de: ubicación, dimensionamiento y capacidad de tratamiento. (Gerba, Thurston, Falabi, Watt, & Karpiscak, 1999).

Los HA son sistemas de Fitodepuración de aguas residuales. Su funcionamiento se basa en el desarrollo de una plantación de macrófitas enraizadas sobre un lecho principalmente de grava impermeabilizado. Por medio de las macrófitas se desarrolla una cadena de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas mediante las cuales se depura de manera lenta pero progresiva el agua residual a tratar. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

Los HA se pueden clasificar en dos grandes grupos:

Según su régimen hidráulico función de cómo el agua a tratar circule a través de ellos: HA de flujo superficial (por encima del sustrato) y HA de flujo subsuperficial (subterráneo, a través del sustrato).

Según su el tipo de macrófitas que se emplee en su funcionamiento: Macrófitas fijas al sustrato (enraizadas) o flotantes libres. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010).

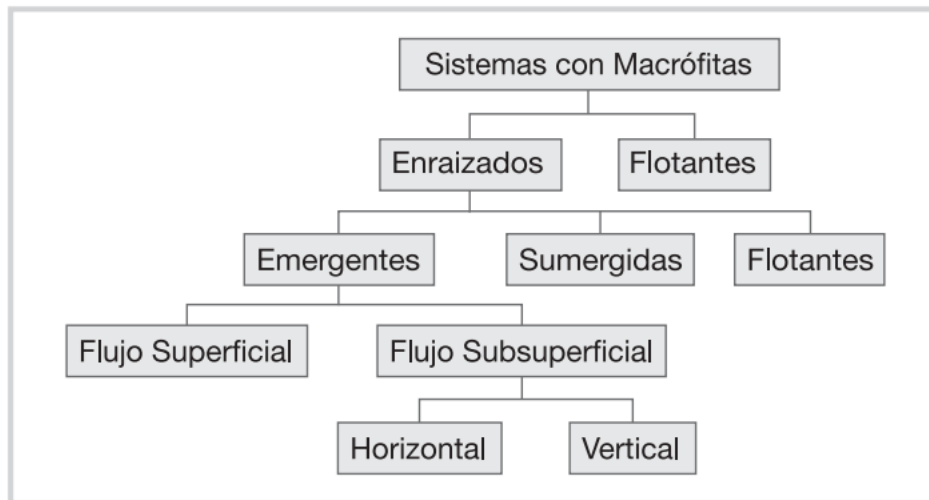


Figura 5. Clasificación de los humedales artificiales. fuente (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

Dos de los componentes principales para el correcto funcionamiento de un humedal son el sustrato y la vegetación.

Sustrato: En los HA están compuesto por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación, como característica principal debe tener una permeabilidad que permita el paso del agua a través de él, por lo cual se emplea suelos de tipo granular por lo general graves con pocos finos y de un diámetro aproximado de

5mm. (Delgadillo, Camacho, Pérez, & Andrade, 2010)

Su importancia radica en que es soporte de muchos organismos vivos y es lugar de transformaciones químicas y biológicas de tipo microbiano y del enraizamiento de la vegetación, su permeabilidad y tamaño de grano condiciona el flujo hidráulico del agua a través del humedal.

Vegetación: Es un factor fundamental en el desarrollo de un HA ya que son las encargadas de retransferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos a sus raíces y rizomas, y en estas zonas donde los microorganismos emplean el oxígeno para generar diferentes reacciones bioquímicas que producen la degradación de la materia orgánica y nitrificación. (Arias, 2004).

La vegetación aporta al tratamiento y al humedal con varias propiedades, entre ellas:

- Estabilizar el sustrato
 - Disminuye la velocidad del flujo, facilitando las bajas velocidades que permiten la sedimentación de materiales en suspensión
 - Incorporación de nutrientes y elementos traza a sus tejidos.
 - Oxigenación del sustrato que posibilita la vida de microorganismos.
 - Intercambio y transferencia de gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- (Lara B. , 1999)

3.3.5.1. Humedales Artificiales de Flujo Superficial (HAFS)

En este tipo de humedales el agua circula preponderantemente a través de los tallos de las plantas y el agua a tratar se encuentra expuesta directamente a la atmósfera con una profundidad menor de 0.6 m. (Salas Rodríguez, Pídre Bocado, & Sánchez Fernández, 2007)

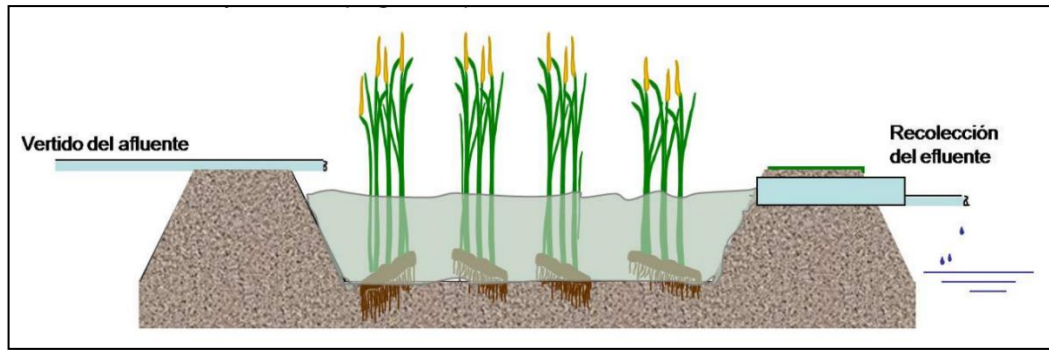


Figura 6. Corte transversal de un Humedal Artificial de Flujo Superficial. Fuente: (García Serrano & Corzo Hernández, 2008)

3.3.5.2. Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSs)

En este tipo de humedales el agua residual a tratar fluye atravesando un material granular entre los que se destacan la grava, arena, y gravilla con una permeabilidad necesaria y suficiente, este material granular se confina con ayuda del medio impermeabilizado y que sirve a su vez de soporte para el enraizamiento y establecimiento de la vegetación, estos pueden ser de tipo horizontal o vertical. (Salas Rodríguez, Pidre Bocado, & Sánchez Fernández, 2007)

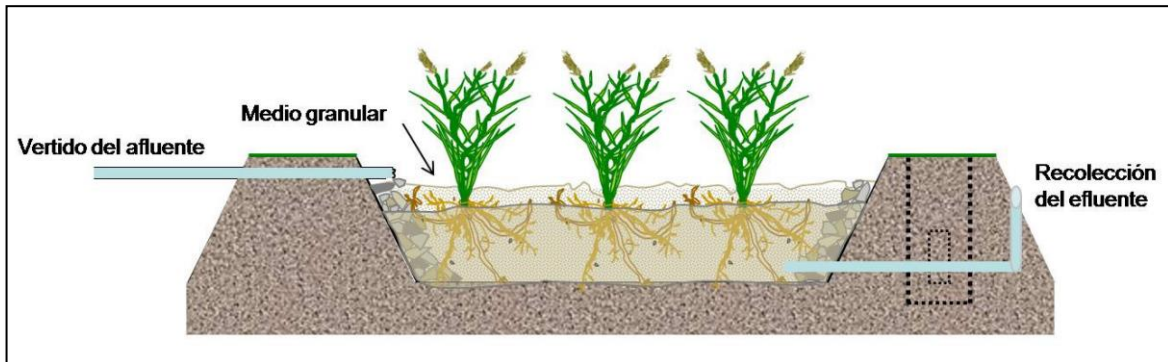


Figura 7. Corte transversal de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal. Fuente: (García Serrano & Corzo Hernández, 2008)

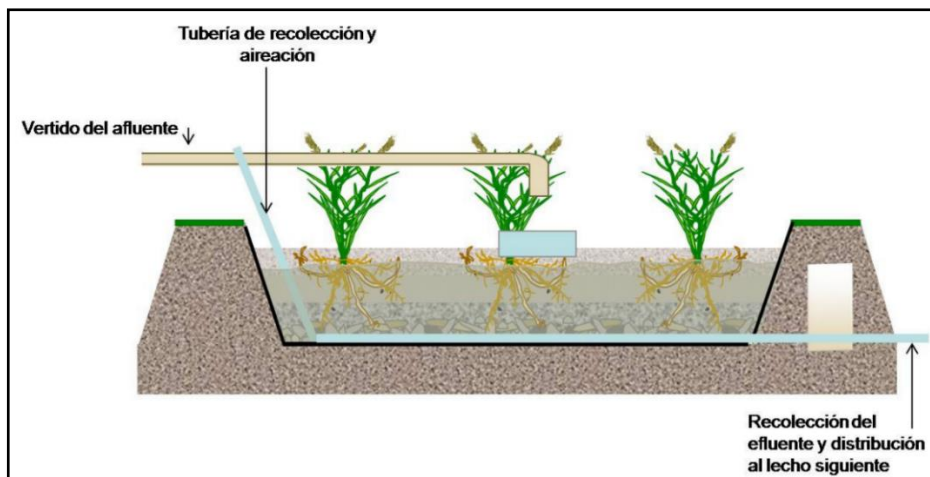


Figura 8. Corte transversal de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical. Fuente: (García Serrano & Corzo Hernández, 2008)

De acuerdo con los estudios realizados por (Salas Rodríguez, Pidre Bocardo, & Sánchez Fernández, 2007) las ventajas y desventajas principales de este tipo de sistemas se resumen a continuación

Ventajas

- Presentan una fácil y sencilla operatividad, las actividades de explotación al consisten básicamente en la retirada de residuos del pretratamiento y el mantenimiento, corte y extracción de la vegetación muerta y seca.
- No tiene consumo energético, siempre y cuando el agua residual circule por gravedad.
- En el caso de los HAFS y de los HAFSsh que operan con elevados tiempos de retención lo que permite que tengan la capacidad de tolerar adecuadamente las puntas o aumentos de caudal y de carga.
- Los HAFS generan zonas de restauración, con la capacidad de propiciar hábitats aptos para la vida salvaje, espacios de educación ambiental y zonas de esparcimiento.
- Tiene una mínima producción de malos olores debido a que no está expuesta al aire el agua a tratar en el caso de los HAFSs.
- Tiene un bajo costo de instalación y mantenimiento, en comparación con los

sistemas convencionales de tipo físicos, químicos y biológicos, cuentan con una alta integración paisajística. Los HA correctamente diseñados y construidos e implementados tienen la capacidad de tratar depurar las aguas domésticas, industriales y las de lluvia, y son muy eficaces en la remoción de contaminantes del agua principalmente como: los sólidos suspendidos, fósforo, nitrógeno, hidrocarburos y metales. Es un sistema apta y segura para el tratamiento y recirculación del agua si se mantienen y operan de forma adecuada. (Miranda Rios, 2000).

Desventajas

- Presentan una exigencia mayor de superficie del terreno. Para su emplazamiento.
- Tiene largos periodos de arranque y puesta en marcha.
- El sistema puede presentar rendimientos inconstantes y variables en comparación con un proceso convencional. Y puede deberse a respuestas del sistema ante factores externos como las variaciones en las condiciones climáticas y ambientales como por ejemplo temporadas de lluvia y de sequía.
- Los HAFSs presentan riesgos de colmatación del sustrato y son susceptibles a cargas elevadas de sólidos en suspensión y grasas.
- Se presentan pérdidas de agua por acción de la evaporación, lo que eleva la concentración de sales de los efluentes tratados.
- Los componentes del sistema son sensibles a sustancias tóxicas como el amoníaco y los pesticidas. (Lara J. , 1999)

4. RESULTADOS

4.1. Descripción del caso aplicado

El humedal artificial con aireación forzada se implementará en Cantero de Letur, es una empresa fundada en 1990 dedicada a la producción de alimentos lácteos ecológicos ubicada en el municipio de Letur- Albacete en la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha.



Figura 9. Logo Cantero de Letur

Los productos lácteos se realizan con leche de vaca, cabra y oveja. Su eje de funcionamiento se basa en el bienestar animal, la tierra, las condiciones laborales, el impulso del desarrollo humano y la vida en un entorno rural sostenible. (Cantero de Letur, 2022)

La granja tiene una población aproximada de 200 vacunos y 3000 caprinos. El proyecto donde se pretende implementar el sistema de tratamiento de aguas residuales con humedal artificial de aireación forzada se enfocará en el tratamiento de los residuos caprinos.

4.2. Zona de estudio

Letur está ubicado al suroeste de la provincia de Albacete, limita al norte con Elche de la Sierra, al este con Ferez y Socovos, al oeste con Nerpio y Yeste y al sureste con Moratalla (Murcia). (Ayuntamiento de Letur, 2022)

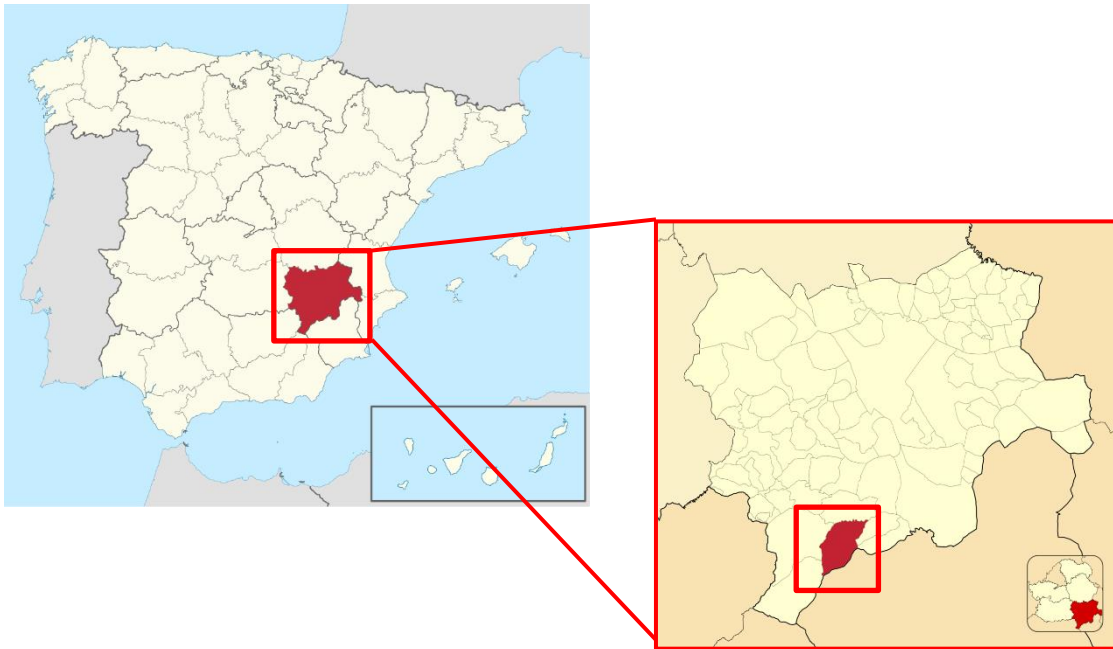


Figura 10. Localización Municipio de Letur- Albacete.

Topografía: Tiene una altitud máxima de 1465 m en la sierra de Zacatín al sur del municipio y una mínima de 460 m al norte. La granja se encuentra a una altura de 880 m.s.n.m

Clima: Tiene una temperatura media anual de 14.3 °C y una precipitación media anual de 452 mm/m². La zona corresponde al piso mesomediterráneo seco.

Hidrología

Letur pertenece a la cuenca hidrográfica del río Segura, sus afluentes principales son el río Taibilla y el arroyo de Letur.

Geografía: El municipio se caracteriza por que predominan materiales provenientes de sedimentos marinos próximos al continente. (Ayuntamiento de Letur, 2022)

Localización de la granja

La granja se encuentra ubicada en las coordenadas 38°19'53.8"N 2°06'19.9"W aproximadamente a 3 km del centro de Letur.



Figura 11. Localización Granja Cantero de Letur

La geología de la localización del proyecto de acuerdo con la hoja 889 Moratella – Cartografía IGME escala 1:50.000. Se encuentra compuesta por caliza masiva perteneciente al Cretácico superior con una antigüedad de 100 millones de años, la zona también se encuentra próxima a un sinclinal lo que genera una discordancia interna en la formación.

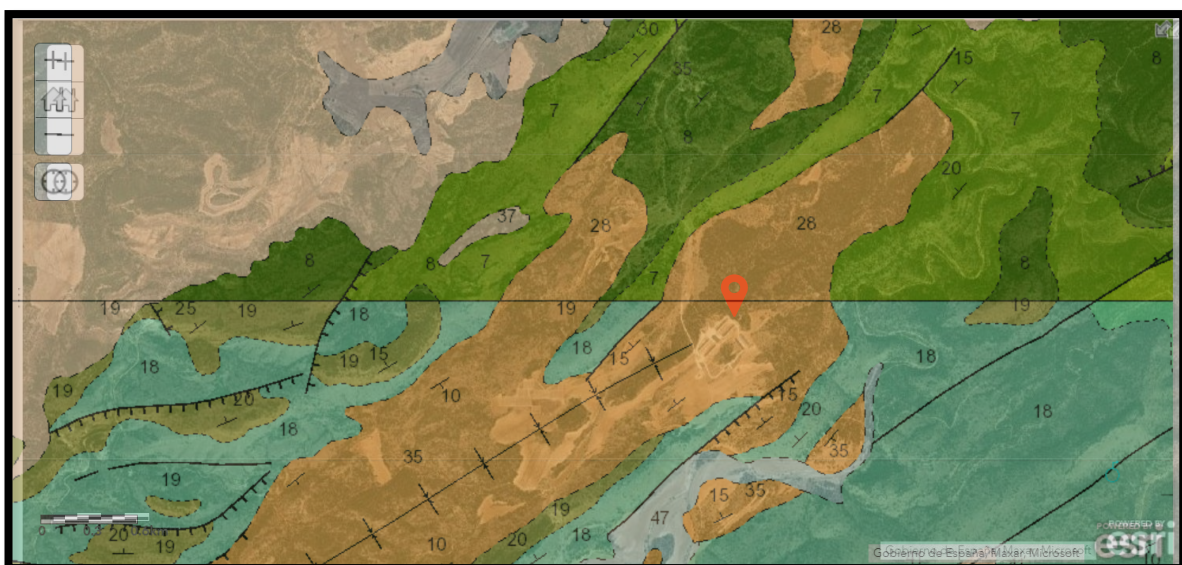


Figura 12. Mapa Geológico. Fuente (IGME)

4.3. Sistema de depuración actual y caracterización del afluente

En las instalaciones de la granja se encuentra emplazado y en un funcionamiento un sistema de depuración que se está compuesto por:

1. Unidad de desbaste con capacidad de 3 m³/día
2. Separador de grasas de 500 Litros
3. Deposito intermedio de decantación de 20 m³
4. Equipo de oxidación total para la depuración de 50 hab-eq, el cual es un sistema que funciona mediante la aireación prolongada. El cual está compuesto por:

Reactor: Encargado de la descomposición biológica de la materia orgánica, en donde por medio de una bomba soplante y unos difusores se somete el agua a aireación prolongada.

Decantador: Para la sedimentación de los fangos por gravedad.

5. Arqueta de toma de muestras
6. Zanja de infiltración que se encuentra fabricada en PVC 200 mm drenante con dimensiones de 0.5 x 0.7 m-25 ml. Que vierte el agua tratada a un campo de grava que realiza una filtración final.



Fotografía 1. Sistema de tratamiento actual por aireación prolongada

El caudal actual de tratamiento es de 6.5 m³/día y cuenta con las siguientes características, teniendo en cuenta que el porcentaje de remoción aproximado se encuentra entre el 80-85%.

Tabla 2. Parámetros del vertimiento sistema actual.

Parámetro	Entrada (mg/L)	Salida (mg/L)	% de remoción
DBO	6233	1100	85
DQO	12143	2000	80
SST	7083	500	85

Como se puede observar a pesar de que el sistema actual cuenta con buenos rendimientos, debido a las altas cargas de concentración inicial el vertido resultante se encuentra con valores por encima de lo permitido por la Ley 5/2002 para los parámetros de DBO (1.000 mg/L) y DQO (1.600 mg/L).

5. DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta la política ambiental y de gestión sostenible de la empresa Cantero de Letur, se busca implementar sistemas más eficientes que permitan una mayor remoción de contaminantes y genere menor impacto sobre el ecosistema.

La empresa se encuentra interesada en la implementación de métodos no convencionales que permitan la integración del sistema con la naturaleza y el entorno y obtener óptimos porcentajes de remoción. De acuerdo con las características del vertido y del lugar de implantación y debido a que el sistema de depuración actual no supe los requerimientos de caudal previstos se propone para el tratamiento un sistema de Humedal Artificial con aireación forzada (F.B.A TM) como tratamiento complementario al ya existente, conectado el vertido de salida dl sistema actual a la entrada del humedal.

5.1. Sistema complementario propuesto.

5.1.1. Principios del funcionamiento humedal artificial con aireación forzada

Los humedales de Aireación forzada en ingles llamado Forced Bed Aeration™ por sus siglas FBA™ son una variación a los humedales artificiales de tipo flujo subsuperficial, el cual se basa en la inyección directa de burbujas de aire desde el fondo o base del humedal, con el fin de aumentar la tasa de transferencia de oxígeno, lo cual incrementa el desarrollo radicular y se pone a disposición de los microorganismos todo el oxígeno que requieren (Salas & Fernandez, 2022).

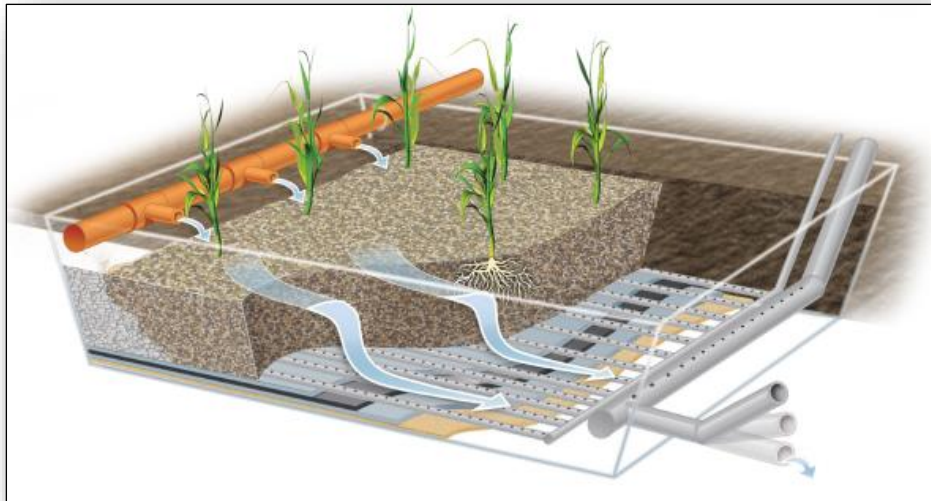


Figura 13. esquema de funcionamiento Humedal artificial con aireación forzada. fuente ((ArmgroupLtd, 2022)

El sistema tendrá un flujo vertical subsuperficial en donde el agua circulara de forma subterránea por a través del medio granular y en contacto con los rizomas y raíces de las plantas macrófitas que serán plantadas durante la construcción de este, al tener un flujo subsuperficial se evitara problemas de malos olores y presencia de vectores (mosquitos).

El humedal operara por gravedad con el fin de que el uso de energía sea mínimo y se limite al funcionamiento del soplador.

El agua residual a tratar se distribuirá a través de cinco tuberías que se localizan en la superficie del humedal, con ello se garantizará un drenaje uniforme sobre el lecho y se logrará una gran transferencia de oxígeno que permitirá el aumento del rendimiento en eliminación de contaminantes y de la actividad microbiana en el humedal. (Asociación para el tratamiento sostenible del agua, 2022)

Con estos sistemas se busca una reducción de espacio y una mayor eficiencia, de este modo disminuir los costos de inversión en construcción y que el tratamiento se desarrolle de forma más efectiva, rápida y adaptable. Logrando una reducción de hasta el 80% del espacio e incrementando hasta 15 veces la capacidad de tratamiento en comparación con un humedal convencional

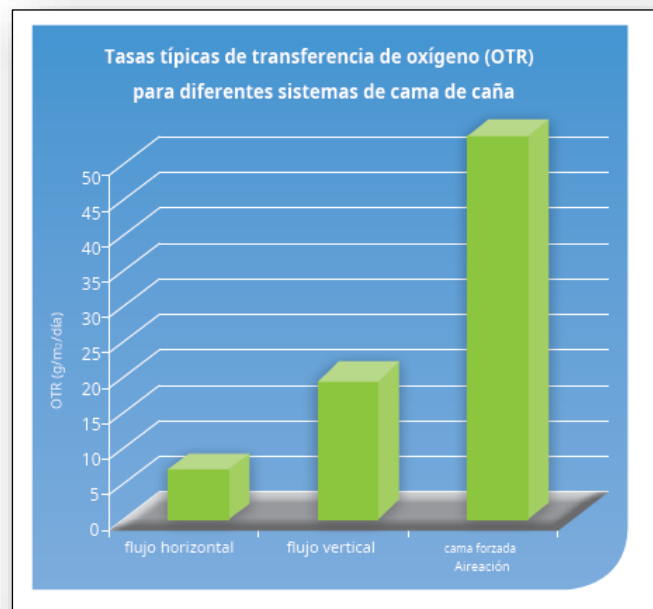


Figura 14. Comparativa de tasas de transferencia de oxígeno en HA fuente (ArmgroupLtd, 2022)

Ventajas sobre los sistemas de humedales convencionales

Las plantas presentan menores tasas de mortalidad, dado que el oxígeno introducido evita la acumulación de productos tóxicos que atrofie el crecimiento de las plantas.

Reducción de las tasas de obstrucción del sistema.

Requiere una entrada de energía mínima para mantener la oxigenación.
(ArmgroupLtd, 2022)

5.1.2. Características del diseño

5.1.2.1. Consideraciones generales

Para la adecuada implementación de un sistema FBA™ es necesario un diseño óptimo y dimensionado de acuerdo con las necesidades y requerimientos propios de cada caso, para lo cual es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones

- Diseño para un mantenimiento mínimo
- Diseñar el sistema para utilizar energías naturales, como el flujo por gravedad para tener consumos energéticos mínimo.
- Diseño para condiciones extremas de tiempo y clima.
- Integrar el diseño con la topografía de la zona.
- Imitar los sistemas naturales, evitar diseños con balsas y estructuras rígidas y de morfología regular.
- Aprovechando las características naturales del sitio para minimizar su perturbación.
- Dar tiempo a que el humedal se estabilice y empiece a funcionar.

En cuanto a la ubicación óptima:

- Espacio disponible con topografía adecuada sin pendientes pronunciadas.
- Lo más cercano posible al afluente y pendiente abajo del sistema para generar movimiento por gravedad.
- Que se encuentre por encima del nivel freático.
- Suelos que puedan ser suficientemente compactados.

Sustrato

Vegetación

5.1.2.2. Materiales y componentes del sistema

Para la correcta implementación de sistema son necesarios los siguientes componentes:

- Membrana impermeable y geotextil: se empleará para la impermeabilización del vaso del humedal, la cual consiste en colocar una lámina de PVC-U que se cubrirá por ambas caras con una manta geotextil.
- Medio granular (arena, grava y piedras): es el sistema de filtro del humedal en el cual se rellena el vaso con varias capas de grava y arena hasta alcanzar la profundidad definida para el humedal.
- Tuberías y accesorios de distribución: el sistema de distribución se colocará encima de la capa de arena son las especificaciones de ancho y distribución de acuerdo con el diseño. Estas tuberías deben estar lo más expuestas posibles con el fin de que sean accesibles para mantenimiento y ajustes, la tubería es cubierta con grava hasta que este a nivel.
- Tuberías y accesorios drenaje: se colocarán tubería en la base del humedal para la evacuación de las aguas depuradas conectadas a una tubería rígida de PVC a la arqueta de control de nivel
- Tuberías y accesorios aireación forzada: Se instalarán tuberías de soplado en la base del humedal conectadas a una tubería de distribución y al soplante.
- Soplante con caja de protección estanca: permitirá la inyección y flujo de oxígeno a las tuberías de aireación forzada
- Instalación eléctrica (base de hormigón, cuadro de mando y protección)
- Plántulas (*Typha latifolia*): se plantará sobre la capa final de gravas a raíz desnuda y la cantidad y distribución de acuerdo con el diseño.

5.1.2.3. Diseño y Dimensiones

Para este tipo de depuración es necesario realizar un estudio previo de los caudales, concentraciones de DQO, DBO₅ y SS para poder establecer las dimensiones optimas de acuerdo con los resultados esperados.

Los cálculos del diseño fueron desarrollados por la consultora Ecolagunas quien es la encargada del desarrollo y emplazamiento del sistema (Anexo I), teniendo en cuenta las características del vertido mencionadas anteriormente se establecen los siguientes parámetros

Caudal previsto a tratar: 12 m³/día

Tiempo de retención aproximado: 14 días

Tabla 3. Dimensiones humedal Artificial FBA

Dimensiones	Ancho (m)	Largo (m)	Profundidad (m)
vaso contenedor	12	18	2
Superficie del humedal	9	15	1.5

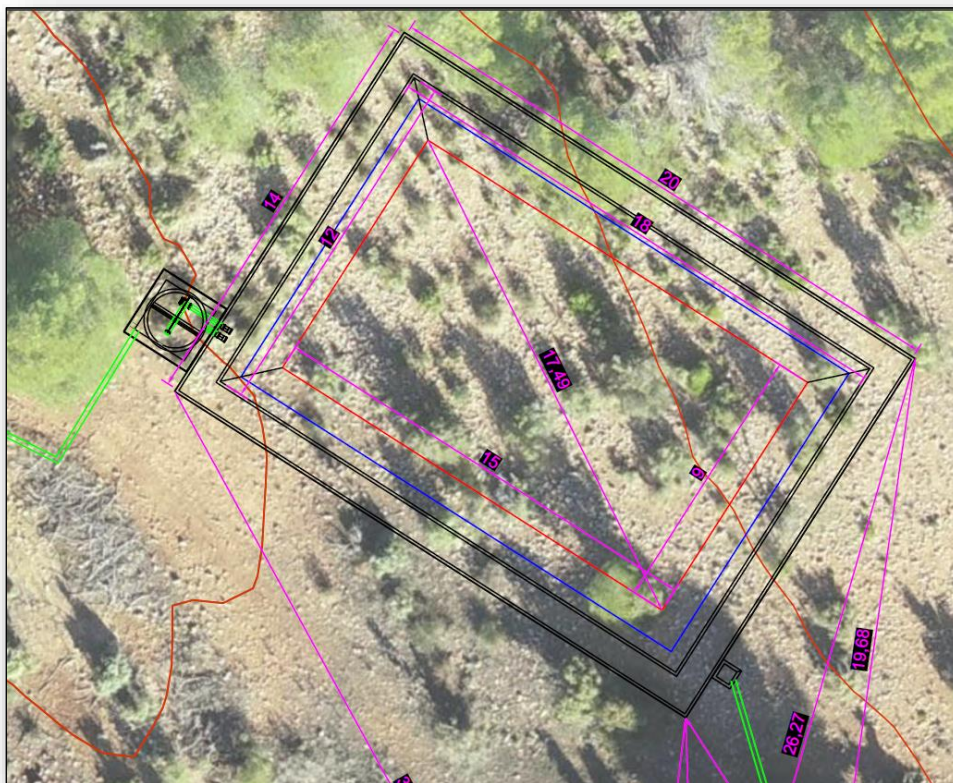


Figura 15. Vista en planta dimensiones de humedal. (Ecolagunas.2022)

El vertido del efluente será al terreno que contine gravas el cual realizará una filtración final.

5.1.2.4. Vegetación del humedal

Se ha seleccionado la espadaña o junco (*Typha latifolia*) son hierbas perennes, rizomatosas y monoicas, hojas gladiadas, con flores en inflorescencia cilíndrica y condensada. Es una especie que crece espontáneamente en los bordes de cursos de agua o en zonas encharcadas (Maxe & Lloclla, 2016).

Puede llegar a una altura de más de 2 m. posee tallos erectos, las hojas son lineares de color verde pálido, su raíz tiene un diámetro de más de 1 m, su tallo un grosor aproximado de 30 cm. Y sus hojas aproximadamente de 150X50 cm. (Rosas, 2018)

Es una de las plantas acuáticas más resistentes y con menores requerimientos para su supervivencia, son capaces de tolerar un amplio rango de temperaturas, sus rizomas se encuentran sumergidos y son capaces de resistir durante periodos muy cortos fuera del agua. no requiere de un suelo especifico ni rico en nutrientes, requiere un agua aireada. (ATSA , 2022)



Fotografía 2. Typha Latifolia. Fuente (ATSA)

Son plantas acuáticas o hidrófitas se caracteriza por ser una planta muy empleada en la Fitodepuración, debido a que posee una gran capacidad de asimilación directa de metales y nutrientes (en especial nitrógeno y fosforo) y son incorporados a su tejido vegetal.

Sus tallos y hojas se componen de unos tejidos huecos, por los cuales se transporta hasta las raíces el oxígeno del aire y el que es producido por acción la fotosíntesis, allí este oxígeno es empleado por los microorganismos de tipo heterótrofos que crecen sobre las raíces y forman sobre ellas una biopelícula, lo cual favorece la disminución de contaminantes mediante los procesos de degradación de tipo aerobio.(Ecodena, 2022).

5.1.2.5. Cálculo de remociones esperadas

Para el humedal Artificial FBA se establecen los siguientes valores de salida del sistema.

Tabla 4. Parámetros de vertimiento estimados del HA

Parámetro	Entrada (mg/L)	Salida (mg/L)	% de remoción
DBO	1100	25	97
DQO	2000	125	93
SST	500	35	93

Teniendo en cuenta el RD 509/1996 se establecen las siguientes concentraciones permitidas para el vertido.

Tabla 5. Concentraciones máximas permitidas según RD 509/1996

CONCENTRACIONES MÁXIMAS PERMITIDAS		
Parámetro	Concentración (mg/l)	% Mínimo de reducción
SS totales	35 mg/l	70/90%
DBO5 (mg/l)	25 mg/l O2	75%
DQO (mg/l)	125 mg/l O2	90%
Ntotal (mg N/l)	10-15 mg/l	80%
Ptotal (mg P/l)	1-2 mg/l	70-80%

Realizando una comparación el sistema propuesto tiene unos porcentajes de remoción entre 93-97% y las concentraciones se encuentran dentro de los valores permitidos por la ley.

5.1.2.6. Análisis económico

- **Costo de emplazamiento del proyecto**

El presupuesto general para el desarrollo y puesta en marcha del humedal con las características descritas anteriormente es el siguiente

Tabla 6. Presupuesto de emplazamiento del HA FBA TM

	Descripción	Costo (€)
1	Movimientos de tierra	
2	Cámaras, arquetas y pozos	
3	Tuberías y accesorios	
4	Impermeabilizaciones	
5	Instalaciones especiales	
6	Instalaciones eléctricas	
7	Control de calidad	
8	Seguridad y salud	
	<i>Presupuesto de ejecución material</i>	54.132,00
	<i>21 % I.V.A</i>	11.367,72
	TOTAL PRESUPUESTO GENERAL	65.499,72

- **Costo de funcionamiento**

Para este sistema se asocia exclusivamente el costo de funcionamiento de la bomba de soplado, el cual presenta las siguientes características.

- Consumo aproximado: 1- 1,25 kW
- Tiempo de funcionamiento: 10h/día
- Precio kW/h: 30 céntimos de €

Por lo cual se estima el funcionamiento de la bomba de soplado en 3650 horas anuales, y teniendo en cuenta el consumo y el costo del Kw/H se calcula un costo energético anual de 1095€.

- **Costo de mantenimiento**

Se estiman 50 horas al año para este tipo de trabajos, los cuales se encuentran enfocados principalmente en la revisión del correcto funcionamiento, en la retirada de hierbas o plantas que puedan crecer en las zonas de pasillos o talud. Estimando un aproximado de 250 €/anuales por si es necesaria la ejecución de alguna de estas actividades. Y un costo adicional de 200 €/anuales destinados a los análisis de la calidad del efluente.

- **Costo anual equivalente**

De acuerdo con los valores estimados anteriormente para el funcionamiento del sistema se establece el siguiente costo por M³ tratado:

Tabla 7. Costo Anual Equivalente (CAE)

Categoría	Valor actual (€)	Periodo de pago (años)	CAE (€)
Instalaciones			
Obra civil	54132	30	-2,254.01 €
Explotación y mantenimiento			
Consumo energético			1095
Mantenimiento			250
Análisis de calidad			200
Total anual			3,799.01 €

El humedal FBA™ diseñado para Cantero de Letur tiene una capacidad de tratamiento de 12m³ día lo que representa un volumen de **4380 m³** anuales.

Coste sin amortización		Coste con amortización en €/m ³	
Coste bruto anual € (energía, mantenimiento y análisis)	1545	Coste bruto anual € (Obra civil, energía, mantenimiento y análisis)	3,799.001
Costo €/m ³	0.35	Costo €/m ³	0.87

- Comparación de costes de explotación de diferentes sistemas de depuración

Para realizar un análisis comparativo de costes se empleen el “Análisis de los costes de explotación y mantenimiento de estaciones depuradoras de aguas residuales de pequeñas aglomeraciones urbanas” generado por el CITEEC.

En la Figura 16 se puede observar en color negro los resultados de costes de explotación y manteniendo obtenidos para diferentes sistemas de depuración en color negro y para el color azul los costes por habitante equivalente de los humedales FBA.

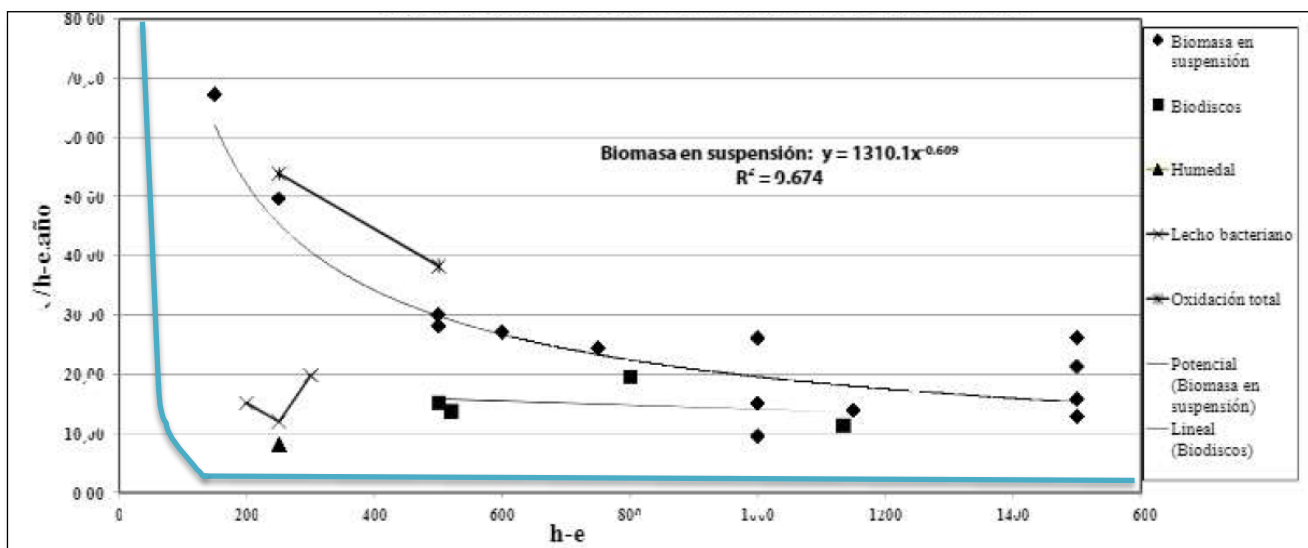


Figura 16. Costes de explotación y mantenimiento por tipología de EDAR (€/h-e. año). Fuente (Torres, y otros, 2013) modificado por Ecolagunas

Se puede observar que los costes de explotación y mantenimiento de este tipo de sistemas son mínimos en comparación con los demás sistemas de depuración, convirtiéndolo en una opción muy competitiva en el mercado que los limitantes para su selección son principalmente la disponibilidad de espacio y los costos asociados a terrenos para su emplazamiento.

6. CONCLUSIONES

- Los humedales artificiales permiten la integración de los sistemas de depuración con el entorno natural, lo cual aporta un valor ambiental agregado, generando espacios de restauración y hábitat de especies, buscando aprovechar al máximo las características naturales del lugar y general el menor impacto posible sobre este, empleando los servicios ecosistémicos y principios de funcionamiento propios de un humedal natural.
- La incorporación de la aireación forzada a los humedales permite que el sistema adquiera mayor eficiencia y pueda tratar cargas y volúmenes mayores y optimiza la utilización del espacio, logrando una reducción de hasta el 80% para su emplazamiento comparado con los humedales tradicionales, por lo cual es posible emplear este sistema en una variedad de vertidos con diferentes caracterización; esta optimización con la aireación forzada permite que este tipo de sistema sea viable para la aplicación en múltiples sectores en donde antes no era posible por sus limitaciones en el rendimiento y a las elevadas necesidades de espacio.
- Se recomienda un tratamiento preliminar del agua residual a depurar en donde se reduzca principalmente los sólidos, para disminuir el riesgo de atascamientos y la generación de malos olores y vectores que puedan afectar la vegetación.
- La implementación de un Humedal Artificial FBA TM requiere de un estudio previo que permita identificar que tan apto es la aplicación de este tipo de sistema y se deben tener en cuenta factores como el sustrato, la pendiente, precipitación y temperatura del lugar donde se podría emplazar, adicional a la caracterización propia del vertido a tratar, sus concentraciones y volúmenes.
- El tratamiento de purines por medio de HA es muy eficaz para la eliminación de contaminantes como: sólidos suspendidos, nitrógeno, fósforo, hidrocarburos y metales empleando el principio de depuración de la vegetación que extrae y emplea como suministro estos componentes.
- La vegetación empleada es uno de los factores fundamentales del éxito de un sistema de HA, aporta propiedades para la estabilización del sustrato,

limita la velocidad y flujo del agua para facilitar la sedimentación de los sólidos, por la incorporación de nutrientes y elementos traza a sus tejidos y la acción de sus raíces y rizomas en la eliminación de sustancias y la formación de biopelículas. Se emplea la espadaña o junco (*Typha latifolia*) por ser una planta acuática de elevada resistencia a las condiciones del ambiente y por su capacidad de asimilación directa de nutrientes particularmente fosforo y nitrógeno. Los cuales son dos principales componentes de los purines caprinos.

- El costo de tratamiento por m³ es de 0.87€ para una granja caprina con 3000 cabezas y con un caudal de 12 M³/día para 50 hab-eq, en donde la principal inversión es la obra civil y adecuación del terreno; es un sistema muy eficiente es su funcionamiento y que no requiere de grandes gastos anuales, se atribuye un gasto mínimo en mantenimiento y análisis de 450 €/anuales y un gasto energético asociado a los sopladores de 1095 €/anuales, lo cual lo hace un alternativa viable económicamente, que no representa elevados gastos de operación y mantenimiento, facilitando su operación y no requiere de personal altamente calificado para su manipulación.
- Los costos de explotación y mantenimiento para los HA FBA™ independientemente de su tamaño son inferiores a los de otras tecnologías, por lo cual uno de los factores limitantes para su implementación es la disponibilidad de espacio; Sin embargo; la bomba de aireación y el consumo energético de su operación es muy bajo, pero representa una gran disminución en costos de inversión inicial al reducir la necesidad de superficie lo cual disminuye a su vez los costos del terreno, obra y construcción.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, A., & Suárez, J. (2006). Tratamiento biológico del lixiviado. *Ingeniería y Desarrollo*, 11.
- Alves, M. (2007). *"Tratamiento de Água e Efluentes Líquidos - Processos*. Recuperado el 2 de mayo de 2022, de <http://www.biologica.eng.uminho.pt/TAEL/downloads/200708/tratament>
- Arana Ysa, V. (2009). *GUÍA PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES NO CONVENCIONALES*. Lima: Avina .
- Arango Bedoya, O., & Sanches, L. (2009). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA EN SISTEMAS ANAEROBIOS TIPO UASB. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*.
- Arcos Serrano, M. E., & Fernández Villagómez, G. (1993). *Procesos biológicos de tratamiento para la estabilización de residuos líquidos tóxicos*. México: Sistema Nacional de Protección civil- Centro nacional de prevención de desastres.
- Arias, C. (2004). Estudio de la biodegradación de la materia orgánica en humedales contruidos de flujo subsuperficial. *Tesina*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- ArmgroupLtd. (24 de 05 de 2022). *armreedbeds.co.uk*. Obtenido de Forced Bed Aeration (FBA): <https://armreedbeds.co.uk/wp-content/uploads/2017/01/FBA-Technology-specific-HQP.pdf>
- Asociación para el tratamiento sostenible del agua. (2022). *OBRAS DE INSTALACIÓN DE UN EQUIPO DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON HUMEDAL AIREADO FBA PARA UN NÚCLEO DE 50-100 Habitantes / Equivalentes*. Sevilla.
- ATSA . (26 de Mayo de 2022). *Asociación para el tratamiento sostenible del agua*. Obtenido de <https://www.tratamientosostenibledelagua.es/typha-latifolia/>
- Ayuntamiento de Letur. (25 de mayo de 2022). Obtenido de <https://www.letur.es/pueblo/relieve-y-clima#:~:text=LA%20HIDROLOGIA,gargantas%2C%20de%20una%20belleza%20excepcional>.
- Blanco, L. (2016). ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE PURINES PARA LA

- OBTENCIÓN DE ESTRUVITA Y BIOGÁS. *Trabajo final de grado*. Universidad Politecnica de Valencia, Valencia.
- Borzacconi, L., & López, I. (1996). COMPARACIÓN DE TRATAMIENTOS AEROBIOS Y ANAEROBIOS APLICADOS A LIXIVIADO DE RELLENO SANITARIO. *Umniversidad de la Republica de Uruguay*.
- Burton, C., & Turner, C. (2003). *Manure Management treatment Strategies for sustainable Agriculture*. Bedford: Silsoe Research Institute.
- Cantero de Letur. (13 de 05 de 2022). *El Cantero de Letur*. Obtenido de <https://elcanterodeletur.com/>
- CASSEEB, M. (1995). "Avaliacao do desempenho de um reator anaerobio de fluxo ascendente e manta de lodo, em escala piloto, tratando esgotos sanitarios da cidade de Belo Horizonte". Brasil: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Castillo, E., Vergara, M., & Moreno, Y. (2007). Landfill leachate treatment using a rotating biological contactor and an upward-flow anaerobic sludge bed reactor. *Waste management* .
- Costley, S., & Wallis, F. (2000). "Effect of flow rate on heavy metal accumulation by rotating biological contactor (RBC) biofilms. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 7.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua.
- Diputación de Palencia. (2007). *Manual sobre depuración en pequeños Municipios en la provincia de Palencia*. Palencia: Colección escuela de alcaldes.
- Ecodena. (26 de mayo de 2022). Obtenido de <https://ventadepantasacuaticas.com/typha-latifolia-o-espadana/#:-:text=La%20Typha%20Latifolia%20es%20una,e%20incorporados%20al%20tejido%20vegetal>.
- García Serrano, J., & Corzo Hernández, A. (2008). *Guía Practica de Diseño, Construcción y Explotación de sistemas de Humedales de Flujo subsuperficial*. Barcelona: Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya.
- Gerba, C. P., Thurston, J. A., Falabi, J. A., Watt, P. M., & Karpiscak, M. M. (1999). Optimization of artificial wetland design for removal of indicator

- microorganisms and pathogenic protozoa. *Water Science and Technology*, 363-368,.
- Gerber, P. J., Steunfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., . . . Tempio, G. (2013). *Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería - Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- lagua. (12 de 05 de 2022). Obtenido de <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-sistema-lodos-activados>
- Lara, B. (1999). Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales. *Tesis de Maestría*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Lara, J. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Barcelona: Universidad politécnica del Cataluña. .
- Lex Nova. (2008). *Manual para la formación en medio ambiente*. Valladolid: Lex Nova.
- Malaspina, F., Cellamare, C., Stante, L., & Tilche, A. (1996). Anaerobic treatment of cheese whey with a downflow-upflow hybrid reactor. *Bioresource Technology*, 131-139.
- Marañón Maison, E., Sastre Andrés, H., Castrillón Peláez, L., González Prendes, J. M., Pertierra Menéndez, J., & Berrueta Jiménez, J. (1998). *Generación de residuos de ganadería vacuna (purines) en Asturias Problemática y tratamiento*. Gijón: Universidad de Oviedo.
- Maxe, M. R., & Lloclla, H. (2016). Microorganismos depuradores asociados con eneas (*Typha latifolia*) en la depuración. *UCV Hacer Revista de investigación y cultura*, 5(1), 10-18.
- Méndez, L., Miyashiro, V., Rojas, R., Cotrado, M., & Carrasco, N. (2004). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MEDIANTE LODOS ACTIVADOS A ESCALA DE LABORATORIO. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 74-83.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2021). *El sector ovino y caprino de leche en cifras: Principales Indicadores Económicos*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Guía para el Manejo, Tratamiento*. Bogotá.
- Miranda Rios, M. (2000). *Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales de*

- los humedales artificiales de flujo horizontal en Mexico*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Química. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Moeller, G., & Tomasini, A. (2004). *Microbiología de lodos activados. Memoria curso internacional de sistemas integrados de tratamiento de aguas residuales y su reuso para un medio ambiente sustentable*. Bogotá: Instituto Mexicano de Tecnología de Agua IMTA.
- Muelas Ramos, V. (2017). Purines su impacto medioambiental en España. *Vida Científica. UNED*, 101-105.
- Orús, F., Quílez, D., & Beltrán, J. (2000). El código de buenas prácticas agrarias (I) Fertilización nitrogenada y contaminación por nitratos. *Informaciones Técnicas*, 1-39.
- Peña Casanova, P. (2012). Alternativas de revalorización de lodos residuales provenientes de planta de lodos activados Celulosa Arauco y Construcción S.A., Plta constitución. *Tesis de Grado*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso.
- Pérez Aristizabal, J. D. (2010). APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN REACTOR DE CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATIVOS (RBC O BIODISCOS) A ESCALA LABORATORIO COMOTRATAMIENTO DE LOS LIXIVIADOS GENERADOS EN EL RELLENO SANITARIO DE LA PRADERA. (*Tesis de Maestría*). Universidad de Medellín, Medellín.
- Ramallo, R. S. (1996). *Introduction to Wastewater Treatment Processes, Second Edition*. Londres: Editorial Reverté.
- Rigola Lapeña, M. (1989). *Tratamiento de aguas industriales: Agua de proceso y residuales*. Barcelona: Marcombo.
- Romero, J. (2008). *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rosas, J. P. (2018). Tratamiento del agua del canal de regadío para remoción de DB05, DQO, Escherichia coli y Coliformes Termotolerantes con Typha latifolia y Phragmites australis en humedales artificiales en el vivero municipal de Los Olivos, 2018.. *Trabajo de Grado*. Universidad César Vallejo, Lima.
- Salas Rodríguez, J. J., Pidre Bocado, J. R., & Sánchez Fernández, L. (2007). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas*

- residuales*. Sevilla: Centro de las Nuevas Tecnologías de Agua. Centa.
- Salas, J. J., & Fernández, L. F. (24 de 05 de 2022). *iagua.es*. Obtenido de Humedales Artificiales Aireados: como intensificar lo extensivo: <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/humedales-artificiales-aireados-como-intensificar-lo-extensivo>
- Seghezzi, L., Zeeman, G., Van Lier, J., Hamelers, H., & Lettinga, G. (1998). The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. *Bioresource Technology*, 175-190.
- Torres, D., Jácome, A., Alonso, F., Arías, R., Ures, P., & Suárez, J. (2013). Análisis de los costes de explotación y mantenimiento de estaciones depuradoras de aguas residuales de pequeñas aglomeraciones urbanas. *entro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil. (CITEEC)*.
- Vernero, M. T., & Arellano, J. (1990). *Aprovechamiento Racional de Desechos Orgánicos*. Facultad Ciencias Agrarias y Forestales. Chile: Universidad de Chile.
- Welter, A., Romero, J., Grumelli, Y., Sánchez, J., & Ascar, G. (2004). La biopelícula en los procesos RBC. *Universiada Católica de Córdoba*.

8. ANEXOS

PLANOS Y DISEÑOS

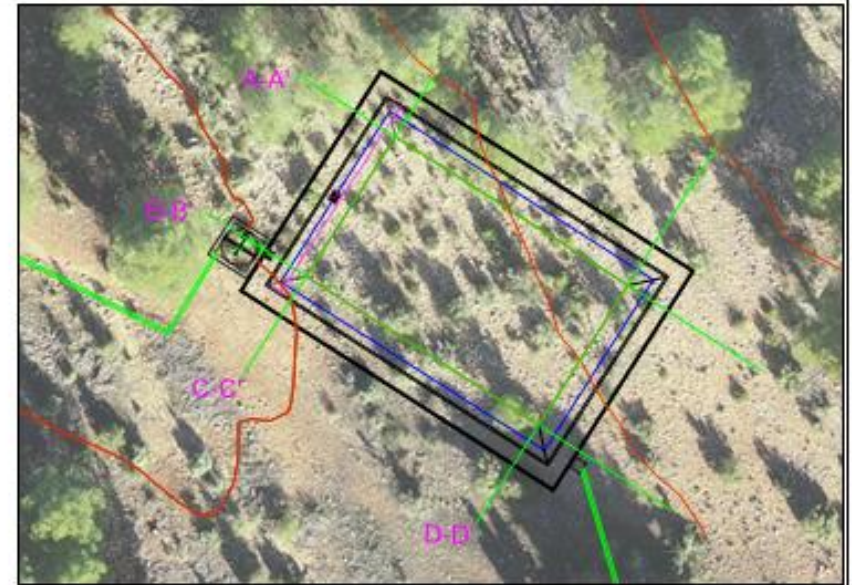
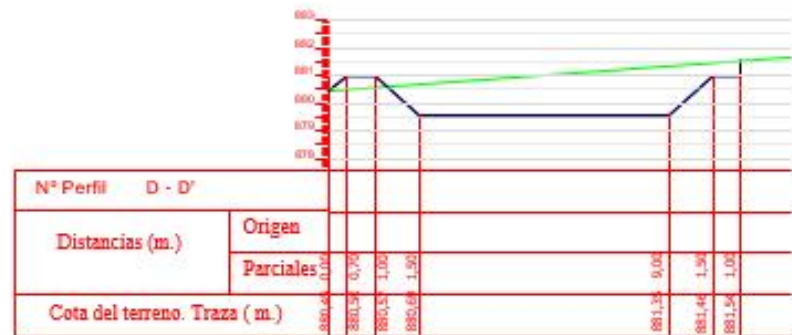
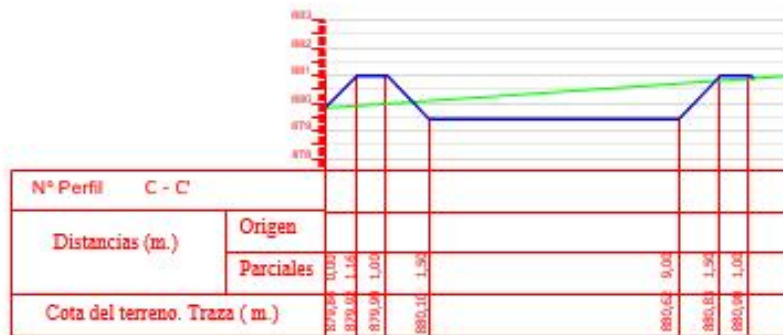
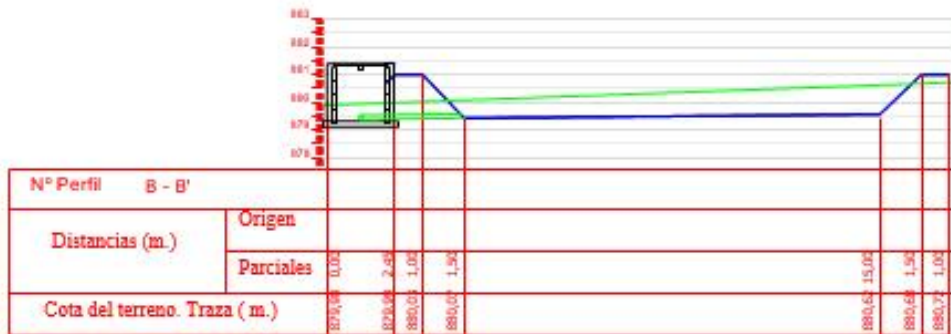
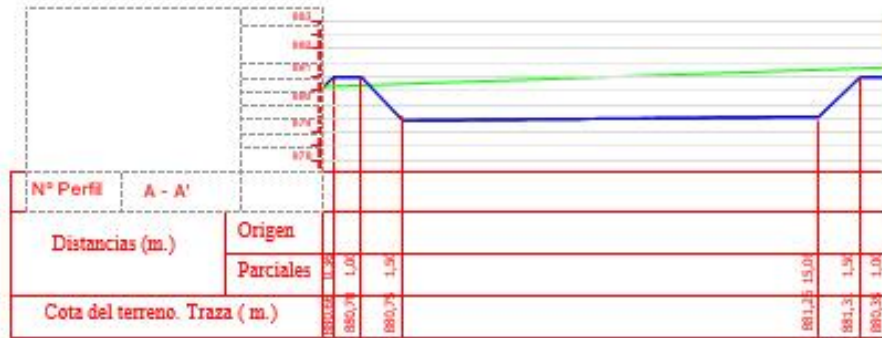


EMPRESA:
 ECOLAGUAS, S.L.
 C/ SAN RODRIGO 31 7º D 28001-DURANGO / TF: +34923850686 / ecologuas@ecologuas.com /
 WWW.ECOLAGUAS.COM

E.D. A.R. CAPRECO

DESIGNACIÓN:
 REPLANTED E.D.A.R.

Nº:
 01

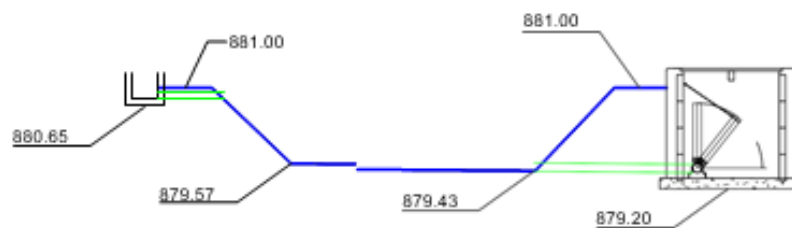
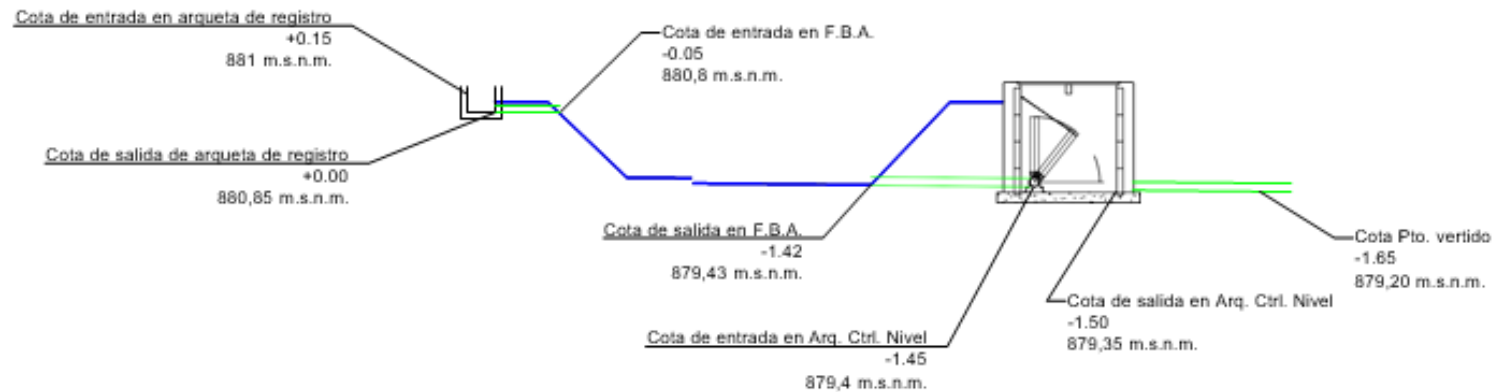


EMISOR/OTORA:
 ECOLAGUAS S.L.
 C/BAÑ ROSADO 01 7º B 30007-OLIVENÇA (TF +34929692086) ecolaguas@ecolaguas.com /
 WWW.ECOLAGUAS.COM

E.D.A.R. CAPRICEO

DESIGNACIÓN:
 REPLANTEO E.D.A.R.

Nº:
 01



C/EMBUJOS
 ECOLAGUAS,S.L.
 C/BAHIA ROSARIO 31 7ºB 32011-DUREN(BC) /TF:+3492885096 /ecolaguas@ecolaguas.com /
 WWW.ECOLAGUAS.COM

E.D.A.R. CAPRECO

DESIGNACIÓN:
 REPLANTED E.D.A.R.

Nº:
 01