



Escola Superior d'Agricultura  
de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO PARA EL TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LA ZONA RURAL DE JAÉN, PERÚ

Trabajo realizado por:

**Carlos Belmonte Calderón**

Dirigido por:

**Marianna Garfí**

**Marco Hartl**

Grado en:

**Enginyeria de Sistemes Biològics**

Castelldefels, 4 de julio de 2018

# TRABAJO FINAL DE GRADO



# AGRAÏMENTS

Les pàgines que segueixen resulten fruit de tots els coneixements, eines i metodologies adquirides durant aquests quatre últims anys. M'emporto amb mi totes les experiències viscudes durant aquests, les bones i les dolentes, les dolces i les agres, doncs totes elles m'han portat on sóc i han determinat qui sóc i com vull ser.

Per això, encara que només resti escrit en un únic full, vull agrair totes les persones que m'han acompanyat durant aquest llarg viatge. Seré breu, doncs podria redactar un altre Treball de Fi de Grau complet sobre elles.

Primer de tot vull donar les gràcies a totes les persones que he conegut a la universitat. Alguns vincles els considero inamovibles i que m'han marcat i marcaran el curs que vull seguir. Va per aquells amb els que continuaré fent camí i per aquells que el tros que vam compartir va ser massa curt. Va per tu Marc, per tu Xavi i sí, també per tu Sergi, encara que amb vosaltres tres era molt més difícil pujar a fer feina a la biblioteca.

Pel Manel i el David, apart d'amics de tota la vida, aquests sí, companys de biblioteca. No és el mateix treballar amb bona companyia que sol. Va doncs, per totes les hores compartides entre cafès i mals de cap.

No puc passar de llarg sense donar les gràcies a la Judith. Ella m'ha fet veure d'una altra manera aquests mesos, els més inestables fins al moment. Només em calia parlar amb ella per estar convençut que tot esforç té la seva recompensa.

El present estudi només seria buit si no hagués sigut per la Marianna Garfí i el Marco Hartl, de la UPC Barcelona. A ells, moltíssimes gràcies per tot el temps i esforç dedicat. Després de tots els problemes, hem pogut tirar endavant tot un treball.

Com no, vull agrair a tota la gent que vaig conèixer al Perú. Gràcies a la Laura i al Cris, companys d'ESF, per la seva incansable ajuda durant la meva estada amb ells, tant a la "chamba" com personalment. Gràcies al Sinclair, a la Sara, al Randy i a la Esther per acollir-me com un més de la família. Arròs, yuca, mango, xocolata... de res em va faltar a casa seva.

Sé que és molt comú donar les gràcies per tot a la família, però és que en el meu cas, cap d'aquestes paraules tindrien sentit sense la meva. A la meva àvia, que encara no és conscient de tot el que fa per nosaltres. Un cafè amb un somriure sincer pel matí i un plat calent a taula per dinar dona forces per tirar endavant tot el que resta de dia. Mare, pare, mai seré capaç d'agrair-vos suficient tots aquests anys dedicats exclusivament a nosaltres, els vostres fills. Tot el que sóc i tot el que m'he vist capaç de ser i de fer ha sigut gràcies a vosaltres. Gràcies per donar-me l'empenta i la seguretat per volar.

A tots ells, aquest treball és vostre.



# **ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO PARA EL TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LA ZONA RURAL DE JAÉN, PERÚ**

## **RESUMEN**

Los humedales construidos son un sistema natural de tratamiento de aguas residuales útil para pequeñas poblaciones. Eliminan las sustancias contaminantes de las aguas residuales a través de mecanismos y procesos naturales los cuales no requieren de energía externa ni de aditivos químicos.

El presente trabajo estudia una solución apropiada para el tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas de una vivienda de pequeños productores de cacao en la zona rural de Jaén, Perú.

Para esta finalidad, se ha diseñado un sistema basado en un humedal construido y se ha llevado a cabo una evaluación del impacto ambiental utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Los resultados obtenidos se han comparado con los impactos generados en el escenario actual, donde el agua utilizada en la vivienda es bombeada desde una fuente lejana.

Atendiendo a los resultados obtenidos del ACV del humedal, podemos observar que los materiales utilizados en la construcción tienen un peso importante en la generación de impacto en la mayoría de categorías estudiadas. Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) repercuten de forma significativa en la generación de impacto de la categoría de cambio climático.

Los resultados obtenidos del ACV del escenario previo a la implementación del humedal (escenario actual) muestran que casi la totalidad del impacto generado en todas las categorías de impacto estudiada proviene del consumo eléctrico por parte del sistema de bombeo.

Comparando los resultados obtenidos de los dos escenarios, se puede observar que con la implementación del sistema diseñado, el impacto generado se vería disminuido entre un 96% y un 99% en todas las categorías de impacto estudiadas.

En conclusión, un sistema de humedales construidos resultaría una tecnología apropiada para el tratamiento y reutilización de aguas residuales en la zona de estudio.

# ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO PARA EL TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LA ZONA RURAL DE JAÉN, PERÚ

## RESUM

Els aiguamolls construïts són un sistema natural de tractament d'aigües residuals útil per a petites poblacions. Eliminen les substàncies contaminants de les aigües residuals a través de mecanismes i processos naturals els quals no requereixen d'energia externa ni d'additius químics.

El present treball estudia una solució apropiada per al tractament i reutilització d'aigües residuals domèstiques d'un habitatge de petits productors de cacau a la zona rural de Jaén, Perú.

Per a aquesta finalitat, s'ha dissenyat un sistema basat en un aiguamoll construït i s'ha dut a terme una avaluació de l'impacte ambiental utilitzant la metodologia d'Anàlisi de Cicle de Vida (ACV). Els resultats obtinguts s'han comparat amb els impactes generats en l'escenari actual, on l'aigua utilitzada en l'habitatge és bombada des d'una font llunyana.

Atenent als resultats obtinguts de l'ACV de l'aiguamoll, podem observar que els materials utilitzats en la construcció tenen un pes important en la generació d'impacte en la majoria de categories estudiades. Les emissions de gasos d'efecte hivernacle (GEH) repercuteixen de forma significativa en la generació d'impacte de la categoria de canvi climàtic.

Els resultats obtinguts de l'ACV de l'escenari previ a la implementació de l'aiguamoll (escenari actual) mostren que gairebé la totalitat de l'impacte generat en totes les categories d'impacte estudiada prové del consum elèctric per part del sistema de bombament.

Comparant els resultats obtinguts dels dos escenaris, es pot observar que amb la implementació del sistema dissenyat, l'impacte generat es veuria disminuït entre un 96% i un 99% en totes les categories d'impacte estudiades.

En conclusió, un sistema d'aiguamolls construïts resultaria una tecnologia apropiada per al tractament i reutilització d'aigües residuals a la zona d'estudi.

# **ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO PARA EL TRATAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN LA ZONA RURAL DE JAÉN, PERÚ**

## **ABSTRACT**

Constructed wetlands are a natural wastewater treatment system useful for small populations. They eliminate contaminating substances from wastewater through natural mechanisms and processes which do not require external energy or chemical additives.

This paper studies an appropriate solution for treatment and reuse of domestic wastewater from a home of cocoa producers in the rural area of Jaén, Peru.

For this purpose, a system based on a constructed wetland has been designed and an environmental impact assessment has been carried out using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The results obtained have been compared with the impacts generated in the current scenario, where the water used in the dwelling is pumped from a distant source.

Based on the results obtained from the LCA of the wetland, we can observe that the materials used in the construction have an important weight in the generation of impact in most of the categories studied. The emissions of Greenhouse Gases (GHG) have a significant impact on the generation of impact of the climate change category.

The results obtained from the ACV of the previous scenario to the implementation of the wetland (current scenario) show that almost the total impact generated in all the categories of impact studied comes from the electrical consumption by the pumping system.

Comparing the results obtained from the two scenarios, it can be seen that with the implementation of the designed system, the impact generated would be reduced between 96% and 99% in all the impact categories studied.

In conclusion, a constructed wetland system would be an appropriate technology for the treatment and reuse of wastewater in the study area.





# Sumario

<b>1. Introducción</b> .....	1
1.1. Agua y saneamiento.....	2
1.2. El contexto peruano .....	3
1.2.1. Saneamiento en Perú.....	4
<b>2. Objetivos</b> .....	5
2.1. Objetivo general.....	6
2.2. Objetivos específicos.....	6
<b>3. Estado del arte</b> .....	7
3.1. Sistemas para el tratamiento de aguas residuales .....	8
3.1.1. Sistemas convencionales .....	8
3.1.2. Sistemas naturales .....	11
3.2. Humedales Construidos .....	12
3.2.1. Humedales construidos de flujo superficial.....	13
3.2.2. Humedales construidos de flujo subsuperficial.....	13
3.2.2.1. Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal.....	14
3.2.2.2. Humedales construidos de flujo subsuperficial vertical .....	14
3.2.2.3. Humedales construidos híbridos.....	16
3.2.3. Componentes de los humedales construidos .....	16
3.2.4. Ventajas y limitaciones de los humedales construidos .....	22
3.3. Descripción general del sistema .....	23
<b>4. Materiales y métodos</b> .....	25
4.1. Caso de estudio: Humedal Construido en Jaén .....	26
4.1.1. Parámetros de diseño y caracterización del agua residual .....	27
4.1.2. Diseño del sistema .....	32
4.1.2.1. Diseño de la fosa séptica .....	32
4.1.2.2. Diseño del humedal construido.....	36

4.2. Análisis del Ciclo de Vida (ACV).....	41
4.2.1. Concepto.....	41
4.2.2. Etapas del Ciclo de Vida .....	42
4.2.3. Etapas de desarrollo de un ACV .....	43
4.2.4. Metodología .....	44
4.2.4.1. Objetivo.....	44
4.2.4.2. Unidad funcional.....	45
4.2.4.3. Alcance del ACV.....	45
4.2.4.4. Metodología utilizada para el ACV.....	47
4.2.4.5. Inventario del Ciclo de Vida (ICV).....	49
4.2.4.6. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.....	49
<b>5. Resultados y discusión .....</b>	<b>52</b>
5.1. Diseño del sistema .....	53
5.2. Inventario del ACV .....	55
5.3. ACV del escenario 1.....	57
5.4. ACV del escenario 2.....	61
5.5. Comparación entre los dos escenarios .....	63
<b>6. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>65</b>
6.1. Conclusiones .....	66
6.2. Recomendaciones.....	67
<b>7. Referencias .....</b>	<b>68</b>

# Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de las cuencas hidrográficas del Perú.....	3
Figura 2: Humedal construido de flujo superficial.....	13
Figura 3: Esquema de un humedal de flujo subsuperficial horizontal.....	14
Figura 4: Esquema de un humedal de flujo subsuperficial vertical. ....	15
Figura 5: Esquema de una fosa séptica con dos cámaras.....	23
Figura 6: Vivienda de la familia beneficiaria en la zona rural de Jaén .....	26
Figura 7: Dimensiones del ladrillo pandereta.....	34
Figura 8: Cálculo de ladrillos necesarios para una pared.....	34
Figura 9: Relaciones entre las etapas del Ciclo de Vida.....	42
Figura 10: Etapas de un ACV .....	44
Figura 11: Límites del ACV.....	46
Figura 12: Diseño de la fosa séptica en alzado .....	53
Figura 13: Diseño de la fosa séptica en planta .....	53
Figura 14: Diseño del humedal construido en alzado.....	54
Figura 15: Diseño del humedal construido en planta.....	54

# Índice de Tablas

Tabla 1: Tratamientos biológicos de aguas residuales. ....	10
Tabla 2: Clasificación de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales .....	11
Tabla 3: especies más utilizadas en humedales construidos .....	20
Tabla 4: Modificación de los LMP de vertido en Perú (1) .....	29
Tabla 5: Modificación de los LMP de vertido en Perú (2) .....	30
Tabla 6: ks en función del material granular utilizado como substrato .....	38
Tabla 7: Características del sistema .....	55
Tabla 8: Inventario de materiales escenario 1.....	55
Tabla 9: Inventario de emisiones directas de GEI escenario 1.....	55
Tabla 10: Inventario del escenario 2 .....	56
Tabla 11: Resultados obtenidos de los escenarios .....	63

# Abreviaciones

<b>ACV</b>	Análisis del Ciclo de Vida
<b>A<sub>s</sub></b>	Área de la sección transversal
<b>C<sub>0</sub></b>	Concentración inicial del contaminante
<b>C<sub>1</sub></b>	Concentración final del contaminante
<b>C<sub>s</sub></b>	Carga orgánica superficial
<b>d</b>	Día
<b>DBO</b>	Demanda Biológica de Oxígeno
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>ECA</b>	Estándares de Calidad Ambiental
<b>eq</b>	Equivalente
<b>GEI</b>	Gases de Efecto Invernadero
<b>h</b>	Altura
<b>k<sub>A</sub></b>	Constante cinética de primer orden
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>k<sub>s</sub></b>	Conductividad hidráulica
<b>kW</b>	Kilovatio
<b>l</b>	Litro
<b>L</b>	Longitud
<b>LMP</b>	Límite Máximo Permisible
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado

<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>Q</b>	Caudal
<b>Q<sub>med,d</sub></b>	Caudal medio diario
<b>S</b>	Superficie
<b>T<sub>H</sub></b>	Tiempo de retención hidráulica
<b>UF</b>	Unidad Funcional
<b>V</b>	Volumen
<b>Vel</b>	Velocidad
<b>W</b>	Anchura







# 1. Introducció

## 1.1. Agua y saneamiento

Hoy en día la relación entre el agua, la higiene y la salud es algo que se da por descontado, pero la realidad es que millones de personas carecen aún de este derecho humano fundamental.

En 1987, la OMS definió el saneamiento como los medios de colección y eliminación de excretas y desechos líquidos comunitarios de una manera higiénica para no poner en peligro la salud de las personas y de la comunidad en general.

Según Mariñelarena (2006), el tratamiento de las aguas residuales debe ser entendido como una necesidad, a fin de mantener condiciones adecuadas de salud e higiene para la población, conservar la calidad de las fuentes de agua y propender a un uso racional y sustentable de los recursos acuáticos.

Además, las inversiones en agua y saneamiento generan beneficios económicos importantes, entre ellos un aumento estimado del 1,5% en el PIB mundial y un retorno de US\$ 4,3 por cada dólar gastado en estos servicios, lo cual refleja la reducción de los costos sanitarios para los individuos y la sociedad, el aumento de la productividad y la mayor participación en el lugar de trabajo resultante del mejor acceso a las instalaciones (OMS, 2017).

La eliminación inocua de las excretas es de fundamental importancia, no solamente para la salud de la comunidad sino también por los beneficios sociales y ambientales que se obtienen. Sin embargo, para muchas comunidades de bajos ingresos, en particular de países en desarrollo, la instalación de un sistema de alcantarillado no es una opción viable porque es muy costosa y exige disponer de agua corriente. Para esas comunidades, la eliminación *in situ*, que permite tratar las excretas donde se depositan, ofrece una solución higiénica y asequible (Franceys *et al.*, 1992).

Teniendo en cuenta los estrechos vínculos entre el nivel de ingresos, el costo y las preferencias culturales, no es difícil comprender la importancia de seleccionar una tecnología adecuada para el tratamiento de aguas residuales dentro de un área de proyecto específica.



### 1.2.1. Saneamiento en Perú

Según Chung (2013), la cobertura de tratamiento de aguas servidas se estimó en 27% a nivel nacional en el año 2007. En otras palabras, casi tres cuartas partes de las aguas residuales generadas no recibieron ningún tipo de tratamiento previo a su disposición final, lo cual representa un serio problema de contaminación al medio ambiente.

En el 2011, el 76,2% de los hogares se abastecieron de agua para consumo humano proveniente del sistema de conexión a una red pública. El 23,8% de hogares restantes consumieron agua proveniente de un camión cisterna, de un pozo o directamente del río (SERVINDI, 2013).

Estos valores aumentaron en los últimos cinco años de 80,9% (2012) a 87,8% (2017). Es un avance importante, sin embargo, aún hay millones de peruanos que carecen de estos beneficios (MINAM, 2017).

Invertir en saneamiento e higiene es equivalente a invertir en desarrollo humano. El factor limitante para alcanzar este objetivo es la falta de conocimiento sobre tecnologías apropiadas y sostenibles que permiten mantener los costos del proyecto a un nivel accesible y aceptable.

En este estudio se diseña y se analiza la implementación de un sistema natural de tratamiento de aguas residuales domésticas que emplea tecnologías apropiadas adaptadas a un área rural en un país de bajos ingresos como Perú.

## 2. Objetivos

## 2.1. Objetivo general

El objetivo general de este estudio ha sido identificar y diseñar una tecnología apropiada para el tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas en la zona rural de Chamaya (Perú) y evaluar sus impactos ambientales.

Para ello, se ha seguido la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) para analizar los impactos ambientales generados por la construcción y operación de un humedal construido previamente diseñado según las características del contexto.

Estos resultados se han comparado con el escenario actual en el que el agua utilizada en la vivienda proviene de una fuente lejana mediante un sistema de bombeo.

## 2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del estudio han sido:

- Diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales formado por un humedal construido considerando una población de 10 personas equivalentes.
- Analizar los impactos ambientales generados por la construcción de este sistema siguiendo la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).
- Evaluar los beneficios ambientales generados por la implementación y operación del humedal construido comparando los resultados obtenidos con el escenario actual.

## **3. Estado del arte**

## 3.1. Sistemas para el tratamiento de aguas residuales

### 3.1.1. Sistemas convencionales

El objetivo principal del tratamiento es que el efluente producido pueda ser amigable para el medio ambiente. Para lograr esto, los contaminantes que contiene el agua residual pueden ser eliminados de diferentes maneras. Existen tratamientos físicos, químicos, biológicos y combinaciones de ellos para el tratamiento de aguas residuales. Todos los tratamientos tienen limitaciones y tanto sus ventajas como sus limitaciones son los que definen sus campos de aplicación (Couto, 2009). En este apartado nos centraremos en los tratamientos biológicos, ya que son los más habituales para el tratamiento de las aguas residuales en términos globales.

El tratamiento biológico de aguas residuales se lleva a cabo mediante una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos (entre los que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes solubles en el agua. Estos procesos aprovechan la capacidad de los microorganismos de asimilar la materia orgánica y los nutrientes (nitrógeno y fósforo) disueltos en el agua residual para su propio crecimiento (Metcalf & Eddy, 2003).

La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, así como la eliminación de compuestos que contienen nitrógeno y fósforo. Es uno de los tratamientos más habituales por su sencillez y su bajo coste económico de operación.

En el metabolismo celular, el aceptor final de electrones juega un papel fundamental en los procesos de oxidación de la materia orgánica. Este aspecto, además, tiene una importante incidencia en las posibilidades de aplicación al tratamiento de aguas residuales. Atendiendo a cuál es dicho aceptor final de electrones se distinguen tres casos (Metcalf & Eddy, 2003):



**Sistemas aerobios:** el oxígeno es el aceptor final de electrones, lo que conlleva que se obtengan rendimientos energéticos elevados y una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias en condiciones aerobias.

**Sistemas anaerobios:** el aceptor final de electrones es la propia materia orgánica que actúa como fuente de carbono. Como resultado de este metabolismo, la mayor parte del carbono se destina a la formación de subproductos de crecimiento como el biogás (compuesto principalmente de CO<sub>2</sub> y metano) que en el presente estudio será considerado más adelante en el análisis del sistema. De cara al tratamiento, este hecho supone una doble ventaja: se produce poca cantidad de lodos a la vez que se produce biogás, el cual puede ser revalorizado.

**Sistemas anóxicos:** el aceptor final de electrones son los nitratos, los sulfatos, el hidrógeno, etc. Cuando el aceptor final de electrones es el nitrato, como resultado del proceso metabólico, el nitrógeno de la molécula de nitrato es transformado en nitrógeno gas. Este proceso es denominado desnitrificación y permite la eliminación biológica del nitrógeno del agua residual.

En la siguiente tabla podemos observar los diferentes tipos de tratamientos biológicos según el proceso que se lleve a cabo:

TIPO	NOMBRE COMÚN	APLICACIÓN
<b>Procesos Aerobios</b>		
Cultivo en suspensión	Proceso de Fangos Activados Convencional (Flujo en Pistón)	Eliminación de la DBO carbonosa (Nitrificación)
	Mezcla Completa	
	Aireación graduada	
	Oxígeno puro	
	Reactor Intermitente Secuencial	
	Contacto y Estabilización	
	Aireación prolongada	
	Canales de oxidación	
	Tanques profundos	
	Deep Shaft	
	Lagunas aireadas	
	Digestión Aerobia	
	Aire convencional	Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa
Oxígeno puro		
Cultivo fijo	Filtros percoladores (baja y alta carga)	Eliminación de la DBO carbonosa (Nitrificación)
	Filtros de desbaste	
	Sistemas biológicos rotativos de contacto (RBC)	
	Reactores de lecho compacto	
Procesos combinados	Biofiltros activados	Eliminación de la DBO carbonosa (Nitrificación)
	Filtros percoladores con contacto de sólidos	
	Procesos de fangos activados con biofiltros	
	Proceso de filtros percoladores y fangos activados en serie	
<b>Procesos Anaerobios</b>		
Cultivo en suspensión	Digestión Anaerobia (baja y alta carga)	Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa
	Proceso anaerobio de contacto	Eliminación de la DBO carbonosa
	Manto de fango anaerobio de flujo ascendente	
Cultivo fijo	Filtro anaerobio	Eliminación de la DBO carbonosa,
	Lecho expandido	Estabilización de residuos (desnitrificación)
<b>Procesos Anóxicos</b>		
Cultivo en suspensión	Desnitrificación con cultivo en suspensión	Desnitrificación
Cultivo fijo	Desnitrificación de película fija	
<b>Procesos Anaerobios, Anóxicos o Aerobios combinados</b>		
Cultivo en suspensión	Procesos de una o varias etapas	Eliminación de la DBO carbonosa, desnitrificación
<b>Procesos combinados</b>		
Cultivo fijo y en suspensión	Procesos de una o varias etapas	Eliminación de la DBO carbonosa, desnitrificación

Tabla 1: Tratamientos biológicos de aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2003).

### 3.1.2. Sistemas naturales

El incremento en la generación de aguas residuales ha obligado a la ingeniería a buscar, encontrar y aplicar alternativas de tratamiento de aguas residuales eficientes, autónomas y económicamente viables. Entre las soluciones más atractivas se encuentran los tratamientos que emulan los fenómenos que ocurren espontáneamente en la naturaleza. Estos sistemas se denominan tratamientos naturales de aguas residuales (Arias, 2003).

Según García y Corzo (2008), los sistemas naturales son aquellos que logran la eliminación de las sustancias contaminantes de las aguas residuales a través de mecanismos y procesos naturales los cuales no requieren de energía externa ni de aditivos químicos. En estos sistemas un buen número de procesos de descontaminación son ejecutados por sinergia de diferentes comunidades de organismos.

Estos sistemas de tratamiento de aguas residuales (denominados “blandos” por el bajo coste energético que supone su aplicación), son una alternativa real a las técnicas convencionales. Inspirados en los sistemas naturales, humedales y lagunas quedan integrados de forma natural en el paisaje. Sus efluentes, de elevada calidad, pueden ser directamente reutilizables como agua para riego (Selma *et al.*, 2003).

En las últimas décadas los sistemas naturales se han venido utilizando de forma creciente gracias a sus características de construcción y funcionamiento: su coste de inversión suele ser competitivo, requieren de poco personal para su mantenimiento, no presentan consumo energético o se reduce al necesario para bombeos de cabecera, y no generan grandes cantidades de lodos de forma continuada (García y Corzo, 2008). Dependiendo si el tratamiento tiene lugar en el terreno o bien en una masa de agua, los sistemas naturales se pueden clasificar en dos categorías:

Sistemas Naturales de Tratamiento de Aguas Residuales				
Basados en la aplicación del agua en el terreno		Basados en los procesos que suceden en la masa de agua		
Aplicación subsuperficial	Aplicación superficial			
Zanjas y lechos filtrantes Humedales contruidos flujo subsuperficial	Filtros verdes Infiltración-Percolación Filtros de arena	Sistemas con plantas flotantes	Lagunaje natural	Humedales contruidos flujo superficial

Tabla 2: Clasificación de los sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales (García y Corzo, 2008).

### 3.2. Humedales Construidos

Los humedales construidos son sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales constituidos por zanjas poco profundas (de menos de 1 m) rellenas de material filtrante como grava y arena y plantadas con vegetales propios de las zonas húmedas. Los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna. Los humedales construidos también se denominan humedales artificiales (García y Corzo, 2008).

En comparación con otros sistemas de depuración, los humedales artificiales son de más bajo costo de construcción y operación, mantenimiento sencillo, monitoreo por parte de operadores no altamente técnicos, y alta capacidad depuradora de las aguas residuales. Los residuos y fangos producidos son bajos y de poco impacto y, además, la vegetación proporciona una apariencia natural (Hench, 2003).

Los humedales tienen tres funciones básicas que les permiten ser un buen sistema para el tratamiento de aguas residuales:

- Fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.
- Utilizan y transforman los elementos por intermedio de los microorganismos.
- Logran altos niveles de tratamiento con un bajo consumo de energía y un bajo mantenimiento.

Dependiendo del flujo de circulación del agua, los humedales construidos se pueden clasificar en dos grupos: de flujo superficial y de flujo subsuperficial.

### 3.2.1. Humedales construidos de flujo superficial

En los sistemas de flujo superficial el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos y hojas de las plantas. Por esta razón son poco utilizados debido a la generación de malos olores y a la proliferación de plagas como insectos. Estos tipos de humedales se pueden entender como una modificación del lagunaje natural con una profundidad de la lámina de agua entre 0,3 y 0,4 m, y con plantas. Se suelen aplicar para mejorar la calidad de efluentes que ya han sido previamente tratados en una depuradora (García y Corzo, 2008).

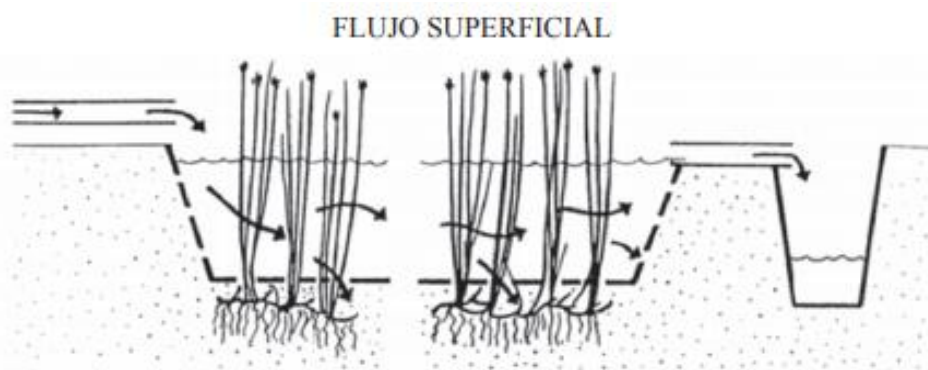


Figura 2: Humedal construido de flujo superficial (Brix, 2004)

### 3.2.2. Humedales construidos de flujo subsuperficial

En los humedales de flujo subsuperficial la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de la lámina de agua suele ser de entre 0,3 y 0,9 m. La biopelícula que crece adherida al medio granular y a las raíces y rizomas de las plantas tiene un papel fundamental en los procesos de descontaminación del agua (García y Corzo, 2008).

Las principales diferencias de los sistemas de flujo subsuperficial respecto a los superficiales son: mayor capacidad de tratamiento (admiten mayor carga orgánica), bajo riesgo de contacto del agua con las personas y de aparición de insectos, y menor utilidad para proyectos de restauración ambiental debido a la falta de lámina de agua accesible (García y Corzo, 2008).

Los humedales construidos de flujo subsuperficial se pueden clasificar en verticales o horizontales según el sistema de circulación del agua.

### 3.2.2.1. Humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal

En este tipo de sistemas el agua circula horizontalmente a través del medio granular y los rizomas y raíces de las plantas. La profundidad del agua es de entre 0,3 y 0,9 m. Se caracterizan por funcionar permanentemente inundados (el agua se encuentra entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie) (García y Corzo, 2008).

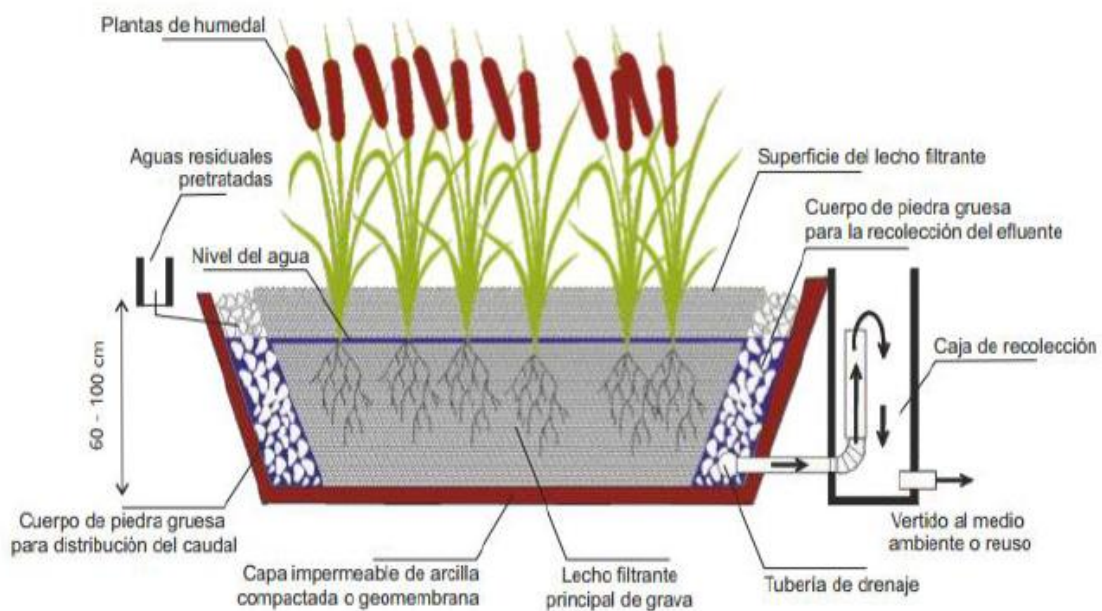


Figura 3: Esquema de un humedal de flujo subsuperficial horizontal (García y Corzo, 2008).

### 3.2.2.2. Humedales construidos de flujo subsuperficial vertical

En los humedales de flujo vertical, las aguas son vertidas sobre toda la superficie de la unidad, donde percolan de manera vertical a través del medio filtrante hasta el fondo (Sánchez *et al.*, 2008).

La circulación del agua es de tipo vertical y tiene lugar a pulsos, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado. La profundidad del medio granular es de entre 0,5 y 0,8 m (García y Corzo, 2008).

Los sistemas verticales tienen una mayor capacidad de tratamiento que los horizontales (requieren de menor superficie para tratar una determinada carga orgánica). Por otra parte, son más susceptibles a la colmatación (García y Corzo, 2008).

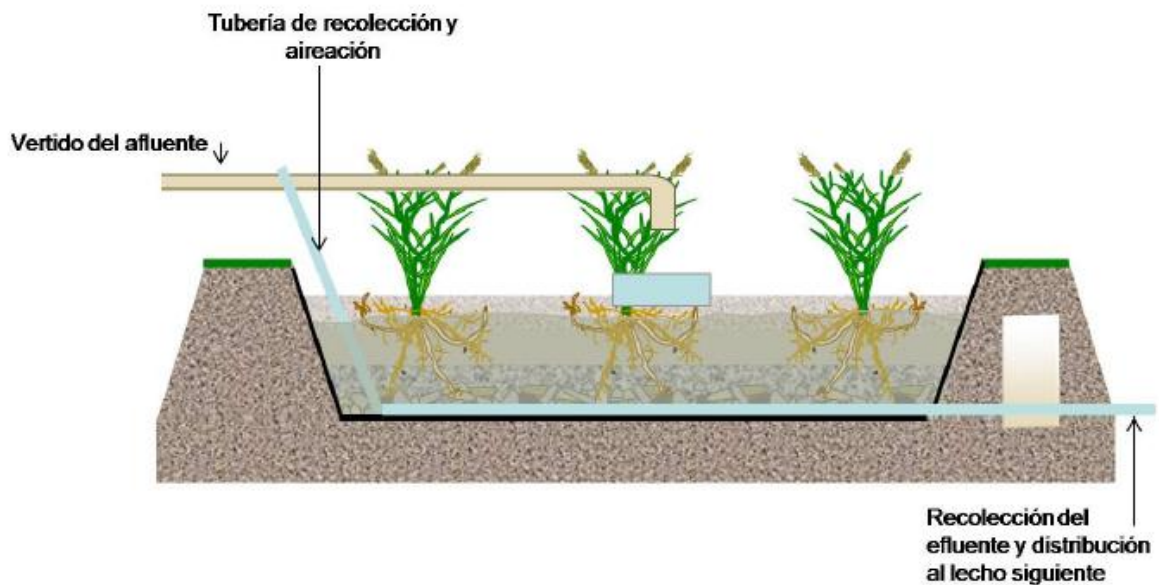


Figura 4: Esquema de un humedal de flujo subsuperficial vertical (García y Corzo, 2008).

Así, pues, los humedales de flujo subsuperficial forman parte de los sistemas naturales de depuración basados en la acción del terreno (como los filtros verdes y los sistemas de infiltración-percolación), mientras que los de flujo superficial pertenecen al grupo de los basados en la acción de mecanismos que suceden en el agua (como los lagunajes) (Sánchez *et al.*, 2008).

### 3.2.2.3. Humedales construidos híbridos

Se trata de humedales verticales seguidos en serie por humedales horizontales. En los verticales se consigue la eliminación de la DBO y la nitrificación, y en los horizontales se consigue desnitrificar (la desnitrificación también se puede conseguir en sistemas verticales de dos etapas recirculado el efluente y mezclándolo con el afluente) (García y Corzo, 2008).

En estos sistemas los diferentes tipos de humedales construidos que difieren en la dirección del flujo del agua se complementan para tratar el agua de una manera específica.

### 3.2.3. Componentes de los humedales construidos

Los humedales construidos están compuestos por los siguientes elementos:

**Agua:** Es probable que se formen humedales en donde se acumule una pequeña capa de agua sobre la superficie del terreno y donde exista una capa del subsuelo relativamente impermeable que prevenga la filtración. Estas condiciones se pueden reproducir modificando la superficie del terreno para que recolecte agua e impermeabilizando el fondo para retenerla. La hidrología en un humedal construido es el factor de diseño más importante, ya que en muchos casos de ella depende el éxito o el fracaso del proyecto (Lara, 1999).

La hidrología en un humedal construido no es muy diferente de la de otras aguas superficiales o cercanas a la superficie, pero difiere en algunos aspectos importantes. Pequeños cambios pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento. Debido al área superficial del agua y a su poca profundidad, el sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración. La densidad de vegetación desarrolla un papel importante en la hidrología del humedal, ya que el agua debe pasar por entre los tallos y raíces y bloquea la exposición al sol y al viento (Lara, 1999).



**Estructuras de entrada y salida:** Los humedales son sistemas que requieren una buena repartición y recogida de las aguas para alcanzar los rendimientos estimados. El agua residual procedente de los tratamientos previos se hace llegar hasta el humedal donde se repartirá de forma equivalente por todo el ancho. El sistema de recogida del agua efluente debe ubicarse al fondo del humedal y se canalizará hasta un depósito para su posterior reutilización (García y Corzo, 2008).

**Impermeabilización:** Es necesario disponer de una barrera impermeable para confinar al sistema y prevenir la contaminación de las aguas subterráneas. Se debe extender uniformemente una geomembrana por el fondo y los laterales del humedal para asegurar una correcta impermeabilización.

**Medio granular:** En el medio granular, formado por grava y arena, ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes, y la inactivación de los microorganismos patógenos (García y Corzo, 2008).

El medio granular debe ser limpio (exento de finos), homogéneo, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo. Además, debe permitir un buen desarrollo de las plantas y de la biopelícula. Diámetros medios de alrededor de 5-8 mm ofrecen muy buenos resultados (García y Corzo, 2008).

El conjunto medio granular/biopelícula/plantas debe ser considerado como el principal constituyente de los humedales.

Sus características físicas se alteran cuando se inundan. En un medio granular saturado, el agua reemplaza los gases atmosféricos en los poros, el metabolismo microbiano consume el oxígeno disponible y puede darse lugar a la formación de un suelo anóxico, lo cual será importante para eliminar contaminantes como el nitrógeno o metales (Lara, 1999).

**Vegetación:** El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia en el sistema (tallos, raíces y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio granular y transporta el oxígeno de manera más profunda de lo que llegaría naturalmente (Lara, 1999).

Los efectos de la vegetación sobre el funcionamiento de los humedales son (García y Corzo, 2008):

- Las raíces y rizomas proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula.

La biopelícula crece adherida a las partes subterráneas de las plantas y sobre el medio granular. Alrededor de las raíces se crean microambientes aeróbicos donde tienen lugar procesos microbianos que usan el oxígeno, como la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación.

- Amortiguamiento de las variaciones ambientales.

Cuando las plantas están desarrolladas reducen la intensidad de la luz incidente sobre el medio granular evitándose así grandes gradientes de temperatura en profundidad que pueden afectar el proceso de depuración. En climas fríos la vegetación protege de la congelación.

- Las plantas asimilan nutrientes.

Su contribución a la eliminación de nutrientes es modesta cuando se tratan aguas residuales urbanas de tipo medio (eliminan entre un 10% del N y un 20% del P). En aguas residuales diluidas su contribución es mayor (más del 50%).

La selección de la vegetación que se va a usar en un sistema de humedales debe tener en cuenta las características de la región donde se realizará el proyecto, así como las siguientes recomendaciones:

1. Las especies deben ser colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.
2. Deben ser especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir la máxima asimilación de nutrientes.
3. La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la biopelícula.
4. Deben disponer de un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación.
5. Se debe tratar de especies que puedan crecer fácilmente en las condiciones ambientales del sistema proyectado.
6. Debe tratarse de especies con una elevada productividad.
7. Las especies deben tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales.
8. Se deben utilizar especies propias de la flora local.

Las especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales se muestran en la siguiente tabla:

Familia	Nombre latino	Nombres comunes más usuales	Temperatura, °C		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de pH
			Deseable	Germinación de las semillas		
Ciperáceas	<i>Carex sp.</i>	-	14-32			5-7,5
	<i>Eleocharis sp.</i>	-				
	<i>Scirpus lacustris L. (*)</i>	Junco de laguna	18-27		20	4-9
Gramíneas	<i>Glyceria fluitans (L.) R. Br.</i>	Hierba del maná				
	<i>Phragmites australis (Cav) Trin. ex Steudel (*)</i>	Carrizo	12-23	10-30	45	2-8
Iridáceas	<i>Iris pseudacorus L.</i>	Lirio amarillo, espadaña fina				
Juncáceas	<i>Juncus sp.</i>	Juncos	16-26		20	5-7,5
Tifáceas	<i>Thypha sp (*)</i>	Eneas, aneas, espadañas.	10-30	12-24	30	4-10

(\*)Especie más utilizada entre todas

Tabla 3: especies más utilizadas en humedales construidos (Lara, 1999)

**Microorganismos:** Las funciones principales de los humedales están reguladas por los microorganismos y su metabolismo. El conjunto de los microorganismos está formado por las bacterias, levaduras, hongos, y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes. En los humedales los microorganismos transforman muchas sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles, alteran el potencial redox del sustrato afectando así la capacidad del proceso del humedal y son uno de los factores más importantes en el reciclaje de los nutrientes (Lara, 1999).

Algunas transformaciones microbianas son aeróbicas (es decir, requieren oxígeno libre) mientras otras son anaeróbicas (tienen lugar en ausencia de oxígeno libre). Muchas especies bacterianas son facultativas, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas en respuesta en los cambios de las condiciones ambientales.

En general las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se extiendan rápidamente cuando tienen suficiente energía. Si las condiciones ambientales no son propicias muchos de estos microorganismos se inactivan y pueden permanecer durante años desactivados (Lara, 1999).

**Animales:** Los animales invertebrados, tales como insectos y gusanos, contribuyen de forma activa al tratamiento de las aguas residuales en un humedal construido al consumir materia orgánica. Las larvas de muchos insectos son acuáticas y consumen durante esa fase bastante volumen de materia orgánica (Lara, 1999).

### 3.2.4. Ventajas y limitaciones de los humedales construidos

Sánchez *et al.* (2008) propuso un seguido de ventajas y limitaciones respecto a estos sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales:

#### Ventajas

- Su mantenimiento es sencillo y mínimo.
- La eficiencia que se puede obtener puede superar a otras opciones de tratamiento como son el biológico y el químico.
- Pueden soportar variaciones de caudal y carga del influente.
- Presentan bajos costos de construcción, energía requerida y explotación.
- No se generan olores, no suelen aparecer problemas de moscas y mosquitos.
- Ofrecen espacios de recreación y se integran bien con el paisaje.
- Su desarrollo presenta un proceso netamente natural y no tiene ninguna limitación.

#### Limitaciones

- Requieren de grandes extensiones de superficie específica.
- Larga puesta en marcha. Desde 3 a 6 meses.
- Debido al número de procesos y mecanismos involucrados, su diseño se hace complejo y los criterios de diseño y funcionamiento no son suficientemente conocidos.
- Necesita como mínimo un año de crecimiento de las plantas para alcanzar el máximo rendimiento.

### 3.3. Descripción general del sistema

De forma general, los sistemas de humedales construidos están formados por 2 unidades de proceso claramente diferenciadas: tratamiento primario y tratamiento secundario (los humedales propiamente).

En este proyecto se ha diseñado una fosa séptica como tratamiento primario y un humedal de flujo subsuperficial horizontal como tratamiento secundario. Debido a que las aguas residuales domésticas de una familia no contienen grandes partículas sólidas que pueden colmatar el sistema ni están formadas por un gran porcentaje de grasas, no es necesario incluir un pre-tratamiento para separar el agua a tratar.

El tratamiento primario tiene como objetivo reducir la materia en suspensión, proceso clave per evitar la colmatación de los sistemas de humedales. Las fosas permiten la sedimentación de la materia en suspensión y su acumulación en el fondo en forma de lodos que se van descomponiendo por vía anaeróbica. A este proceso de descomposición se le suele denominar digestión y permite reducir el volumen de lodos gracias a la producción de gases, principalmente dióxido de carbono y metano (García y Corzo, 2008).

Las fosas más habituales (figura 5) suelen tener dos o más cámaras cuyo fin es la laminación de los caudales entrantes, de modo que se evite la resuspensión de los sólidos sedimentados. La mayor parte de los sólidos sedimentan en la primera cámara y por tanto es donde hay más lodos. Los gases producidos en la fosa se emiten a través de chimeneas. De esta manera se evitan malos olores, que pueden ser especialmente molestos en el caso de saneamiento autónomo. Adicionalmente, las fosas están dotadas de aberturas que permiten su inspección y vaciado.

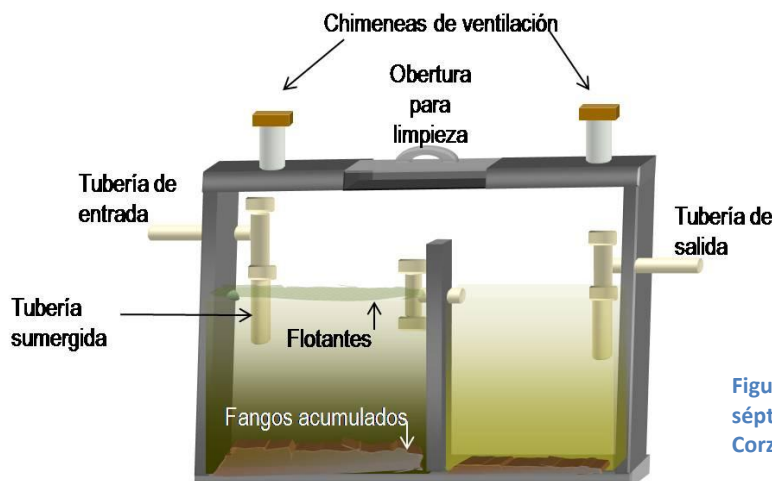


Figura 5: Esquema de una fosa séptica con dos cámaras (García y Corzo, 2008)

Para canalizar el agua desde la vivienda hasta el tratamiento primario y de éste al tratamiento secundario se utilizarán tubos de PVC.

El agua ya tratada (efluente del humedal construido) podrá ser recogida en un tanque de recolección o bien dejar que se vierta por el terreno y así regar directamente el campo.



## 4. Materiales y métodos

#### 4.1. Caso de estudio: Humedal Construido en Jaén

El presente estudio analiza la viabilidad de la construcción de un sistema natural de tratamiento de aguas residuales mediante un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal en la zona rural de Jaén, Perú (ver Anexo 1).

El sistema se ha diseñado para tratar las aguas residuales domésticas de una familia de pequeños productores de cacao. La vivienda cuenta con una pequeña planta procesadora de cacao que prevé ser ampliada el año que viene. Es por eso que para su diseño y construcción se ha tenido en cuenta una población de 10 personas equivalentes, incluyendo a los obreros que trabajarán en la planta, y un caudal medio diario de 0,6 m<sup>3</sup>/d teniendo en cuenta el uso del baño y de la ducha de los dueños de la vivienda y de los trabajadores.

Como se trata de una zona de gran escasez de agua, se ha diseñado el sistema con finalidad de reutilizar el agua tratada para riego o para bebida de animales. Así pues, con la implementación de este sistema se reciclaría el agua aparte de descontaminarla.

Actualmente, el agua utilizada en la vivienda proviene de una fuente lejana mediante un sistema de bombeo y el agua residual doméstica generada por la familia es derramada por el campo sin ningún tipo de control ni tratamiento, contaminando el campo de cultivo y el río que bordea el terreno.



Figura 6: Vivienda de la familia beneficiaria en la zona rural de Jaén (fuente propia)

### 4.1.1. Parámetros de diseño y caracterización del agua residual

Para llevar a cabo el diseño del sistema se ha tenido que fijar con anterioridad las características deseadas del agua efluente ya tratada. Las concentraciones de contaminantes del agua a la salida del humedal construido deben respetar el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) y deben estar por debajo de los Límites Máximos Permisibles (LMP) de vertido en Perú.

El Ministerio del Ambiente de Perú (MINAM), define estos parámetros como:

El Estándar de Calidad Ambiental es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el ambiente (aire, agua o suelo) que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente.

El Límite Máximo Permissible es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente.

Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y los Límites Máximos Permisibles (LMP) son instrumentos de gestión ambiental que consisten en parámetros y obligaciones que buscan regular y proteger la calidad y salud ambiental.

Queda claro entonces, que la diferencia que existe entre ambos parámetros, es que la medición de un ECA se realiza directamente en los cuerpos receptores, mientras que en un LMP se da en los puntos de emisión y vertimiento.

El mes de marzo del 2017, el MINAM aprobó la modificación de los Estándares nacionales de Calidad Ambiental para agua, recogiendo los cambios en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. En él, aparecen las modificaciones de los ECA y de los LMP de riego de vegetales y bebida de animales en la categoría 3 del segundo artículo. Es necesario definir y diferenciar entre:

#### **Riego de vegetales:**

Entiéndase como aquellas aguas utilizadas para el riego de los cultivos vegetales, las cuales, dependiendo de factores como el tipo de riego empleado en los cultivos, la clase de consumo utilizado (crudo o cocido) y los posibles procesos industriales o de

transformación a los que puedan ser sometidos los productos agrícolas, se pueden diferenciar entre:

- **Agua para riego no restringido**

Entiéndase como aquellas aguas cuya calidad permite su utilización en el riego de: cultivos alimenticios que se consumen crudos (Ej.: hortalizas, plantas frutales de tallo bajo o similares); cultivos de árboles o arbustos frutales con sistema de riego por aspersión, donde el fruto o partes comestibles entran en contacto directo con el agua de riego, aun cuando estos sean de tallo alto; parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales; o cualquier otro tipo de cultivo.

- **Agua para riego restringido**

Entiéndase como aquellas aguas cuya calidad permite su utilización en el riego de: cultivos alimenticios que se consumen cocidos (Ej.: habas); cultivos de tallo alto en los que el agua de riego no entra en contacto con el fruto (Ej.: árboles frutales); cultivos a ser procesados, envasados y/o industrializados (Ej.: trigo, arroz, avena y quinua); cultivos industriales no comestibles (Ej.: algodón), y; cultivos forestales, forrajes, pastos o similares (Ej.: maíz forrajero y alfalfa).

**Bebida de animales:**

Entiéndase como aquellas aguas utilizadas para bebida de animales mayores como ganado vacuno, equino o camélido, y para animales menores como ganado porcino, ovino, caprino, cuyes, aves y conejos.

Una vez definidos todos los parámetros, vienen dados en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM los nuevos LMP de vertido en Perú y, entre ellos, aparecen los adjudicados a las aguas destinadas para el riego de vegetales y para la bebida de animales en la categoría 3 (ver Tabla 4 y Tabla 5).

**Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales**

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
<b>FÍSICOS- QUÍMICOS</b>				
Aceites y Grasas	mg/L	5		10
Bicarbonatos	mg/L	518		**
Cianuro Wad	mg/L	0,1		0,1
Cloruros	mg/L	500		**
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	100 (a)		100 (a)
Conductividad	( $\mu$ S/cm)	2 500		5 000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	15		15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2		0,5
Fenoles	mg/L	0,002		0,01
Fluoruros	mg/L	1		**
Nitratos (NO <sub>3</sub> -N) + Nitritos (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L	100		100
Nitritos (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L	10		10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 5
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5		6,5 – 8,4
Sulfatos	mg/L	1 000		1 000
Temperatura	°C	Δ 3		Δ 3
<b>INORGÁNICOS</b>				
Aluminio	mg/L	5		5

Tabla 4: Modificación de los LMP de vertido en Perú (1) (MINAM, 2017)

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
Arsénico	mg/L	0,1		0,2
Bario	mg/L	0,7		**
Berilio	mg/L	0,1		0,1
Boro	mg/L	1		5
Cadmio	mg/L	0,01		0,05
Cobre	mg/L	0,2		0,5
Cobalto	mg/L	0,05		1
Cromo Total	mg/L	0,1		1
Hierro	mg/L	5		**
Litio	mg/L	2,5		2,5
Magnesio	mg/L	**		250
Manganeso	mg/L	0,2		0,2
Mercurio	mg/L	0,001		0,01
Niquel	mg/L	0,2		1
Plomo	mg/L	0,05		0,05
Selenio	mg/L	0,02		0,05
Zinc	mg/L	2		24
<b>ORGÁNICO</b>				
<b>Bifenilos Policlorados</b>				
Bifenilos Policlorados (PCB)	µg/L	0,04		0,045
<b>PLAGUICIDAS</b>				
Paratión	µg/L	35		35
<b>Organoclorados</b>				
Aldrín	µg/L	0,004		0,7
Clordano	µg/L	0,006		7
Dicloro Difenil Tricloroetano (DDT)	µg/L	0,001		30
Dieldrín	µg/L	0,5		0,5
Endosulfán	µg/L	0,01		0,01
Endrín	µg/L	0,004		0,2
Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0,01		0,03
Lindano	µg/L	4		4
<b>Carbamato</b>				
Aldicarb	µg/L	1		11
<b>MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO</b>				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1 000	2 000	1 000
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	1 000	**	**
Huevos de Helmintos	Huevo/L	1	1	**

Tabla 5: Modificación de los LMP de vertido en Perú (2) (MINAM, 2017)

En estas tablas aparecen letras y símbolos con el siguiente significado:

(a): Para aguas claras. Sin cambio anormal (para aguas que presentan coloración natural).

(b): Después de filtración simple.

(c): Para el riego de parques públicos, campos deportivos, áreas verdes y plantas ornamentales, sólo aplican los parámetros microbiológicos y parasitológicos del tipo de riego no restringido.

$\Delta 3$ : significa variación de 3 grados Celsius respecto al promedio mensual multianual del área evaluada.

El símbolo \*\* dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta subcategoría.

Los valores de los parámetros se encuentran en concentraciones totales, salvo que se indique lo contrario.

### 4.1.2. Diseño del sistema

Para el dimensionamiento del sistema se han seguido las ecuaciones propuestas por García y Corzo (2008).

#### 4.1.2.1. Diseño de la fosa séptica

El dimensionamiento de la fosa involucra un seguido de cálculos que se muestran a continuación. Para empezar, se parte de un caudal medio diario ( $Q_{med,d}$ ) y de un Tiempo de Retención Hidráulica ( $T_H$ ).

En este estudio,  $Q_{med,d} = 600L/día$ :

$$Q_{med,d} = \frac{600L}{1día} \times \frac{1dm^3}{1L} \times \frac{1m^3}{1000dm^3} = \frac{0,6m^3}{día}$$

Parámetros recomendados para la construcción de una fosa séptica según García y Corzo (2008):

- V min. agua + fangos =  $1,5 \cdot Q_{med,d} = 0,9 m^3$
- Altura resguardo > 0,25m
- Velocidad acumulación de fangos = 0,5L/hab·día
- 2 compartimentos, uno de  $V \cdot 2/3$  y otro de  $V \cdot 1/3$
- Dimensiones:  $4 \cdot Ancho > Largo > 2 \cdot Ancho$

Cálculo del volumen total de la fosa séptica:

$$V_{total} = V_{agua} + V_{lodos} + V_{resguardo}$$

$V_{agua}$ :

$$V_{agua} = T_H \times Q_{med,d}$$

$$V_{agua} = 6 \text{ días} \times \frac{0,6m^3}{día} = 3,6m^3$$

Para calcular el ancho y el largo de la fosa séptica adoptamos una altura de agua de 0,7m. Sabemos que  $4A > L > 2A$ . Suponemos que  $L=3A$ . Así:

$$\begin{aligned} V_{agua} &= L \times A \times h_{agua} \\ 3,6m^3 &= 3 \times A^2 \times 0,7m \end{aligned}$$

$$A^2 = 1,714 \rightarrow A = 1,3m \rightarrow L = 3,9m$$

$$S = L \times A = 5,07m^2$$



$V_{lodos}$ :

$$V_{lodos} = Vel_{acum} \times 365 \times P_{vaciado} \times N$$

$$V_{lodos} = \frac{0,5L}{hab \times día} \times 365 \frac{días}{año} \times 1 año \times 10 hab = 1,83m^3$$

Altura de los lodos:

$$h_{lodos} = \frac{V_{lodos}}{S} = \frac{1,83m^3}{5,07m^2} = 0,36m$$

$V_{resguardo}$ :

$$V_{resguardo} = S \times h_{resguardo}$$

$$V_{resguardo} = 5,07m^2 \times 0,3m = 1,52m^3$$

Así pues:

$$V_{total} = 3,6m^3 + 1,83m^3 + 1,52m^3 = 6,95m^3$$

Calculamos el volumen y medidas relativas de los dos compartimentos.

**Compartimento 1:**

$$V = \frac{2}{3} \times 6,95m^3 = 4,63m^3$$

$$A = 1,3m$$

$$L = \frac{2}{3} \times 3,9 = 2,6m$$

$$h = 1,37m$$

**Compartimento 2:**

$$V = \frac{1}{3} \times 6,95m^3 = 2,32m^3$$

$$A = 1,3m$$

$$L = \frac{1}{3} \times 3,9 = 1,3m$$

$$h = 1,37m$$

### Cálculo de ladrillos

Para su construcción se ha considerado la utilización ladrillos del tipo pandereta. Las dimensiones así como las ecuaciones para el cálculo de ladrillos necesarios para la construcción de la fosa séptica se han extraído del *Manual de construcción para maestros de obra* (Meneses, 2006).



Figura 7: Dimensiones del ladrillo pandereta

El número de ladrillos necesarios para una pared vienen determinados por la siguiente ecuación:

$$CL = \frac{1}{(L + J_h) \times (H + J_v)}$$

$CL$  = cantidad de ladrillos por  $m^2$   
 $L$  = longitud de ladrillo (m)  
 $J_h$  = espesor junta horizontal (m)  
 $H$  = altura del ladrillo (m)  
 $J_v$  = espesor junta vertical (m)

Figura 8: Cálculo de ladrillos necesarios para una pared

Se supone un espesor de las juntas ( $J_h$  y  $J_v$ ) de 1,5 cm.

Con las dimensiones del ladrillo sabemos que  $L = 23$  cm y  $H = 10$  cm.

$$CL \left( \frac{\text{ladrillos}}{m^2} \right) = \frac{1}{(L + J_H) \times (H + J_V)}$$

$$CL = \frac{1 \text{ ladrillo}}{(0,23m + 0,015m) \times (0,1m + 0,015m)}$$

$$CL = 35,5 \frac{\text{ladrillos}}{m^2} \sim 36 \frac{\text{ladrillos}}{m^2}$$

Se considera un desperdicio (rotura de ladrillos) del 5%, así pues el número de ladrillos necesarios para un m<sup>2</sup> de pared aumenta a:

$$5\% \text{ desperdicio: } 36 + 0,05 \times 36 = 37,8 \frac{\text{ladrillos}}{m^2} \sim 38 \frac{\text{ladrillos}}{m^2}$$

La fosa séptica estará constituida por 5 paredes para las que se necesitará el siguiente número de ladrillos:

- 2 paredes de 1,30m x 1,37m = 1,781 m<sup>2</sup>

$$1,781m^2 \times \frac{38 \text{ ladrillos}}{m^2} = 67,677 \text{ ladrillos} \sim 68 \text{ ladrillos}$$

$$\frac{68 \text{ ladrillos}}{\text{pared}} \times 2 \text{ paredes} = 136 \text{ ladrillos}$$

- 1 pared de 1,30m x 1,17m = 1,521 m<sup>2</sup>

$$1,521m^2 \times \frac{38 \text{ ladrillos}}{m^2} = 57,798 \text{ ladrillos} \sim 58 \text{ ladrillos}$$

- 2 paredes de 4,26m x 1,37m = 5,836 m<sup>2</sup>

$$5,836m^2 \times \frac{38 \text{ ladrillos}}{m^2} = 221,776 \text{ ladrillos} \sim 222 \text{ ladrillos}$$

$$\frac{222 \text{ ladrillos}}{\text{pared}} \times 2 \text{ paredes} = 444 \text{ ladrillos}$$

El número total de ladrillos necesarios será la suma de los ladrillos necesarios para cada pared:

$$\text{Número total de ladrillos} = 136 + 58 + 444 = \mathbf{638 \text{ ladrillos}}$$

#### 4.1.2.2. Diseño del humedal construido

En este apartado se ha seguido la metodología propuesta por García y Corzo (2008). Para su dimensionamiento es necesario el análisis de una muestra del agua que tratará el humedal, es decir, una muestra del agua que sale de la fosa séptica. De esta muestra se debe analizar el parámetro que queramos que trate nuestro humedal. En este proyecto, y siguiendo la metodología propuesta, se ha trabajado con un sistema diseñado para reducir la DBO<sub>5</sub>.

Conocida la calidad del agua que entrará al humedal necesitamos saber la calidad deseada del agua que sale del humedal para su diseño. En este proyecto, la calidad del agua tratada deberá estar por debajo de los Límites Máximos Permisibles de vertido de aguas residuales en Perú. Como se quiere reutilizar el agua, se debe tener en cuenta la calidad del agua establecida para el riego y para animales.

Por falta de datos referentes a la calidad del agua de salida de la fosa séptica (efluente), se ha tenido en cuenta la calidad del agua de entrada (afluente) y se ha aplicado una eficiencia de eliminación de DQO y de DBO<sub>5</sub> de la fosa séptica del 30% (García y Corzo, 2008). Para el agua de entrada al humedal construido se ha calculado una DBO<sub>5</sub> de 80 mg/L i una DQO de 160 mg/L. A través de la web del Ministerio del Ambiente de Perú se obtuvieron las cifras de los LMP de vertido en Perú. Para el agua de riego de hortalizas de consumo en crudo (valores inferiores a las hortalizas cocinadas) como para el agua para bebida de animales se indica un valor de DBO<sub>5</sub> máximo de 15 mg/L i de DQO máximo de 40 mg/L (Tabla 4). Para el diseño del humedal se siguieron las ecuaciones siguientes propuestas por García y Corzo (2008):

#### Dimensionamiento biológico

$$S = \frac{Q}{K_A} \ln \left( \frac{C_0}{C_1} \right)$$

Donde:

S (m<sup>2</sup>): superficie mínima del humedal

Q (m<sup>3</sup>/d): caudal medio diario

K<sub>A</sub> (m/d): constante cinética de primer orden. Su valor varía en función del contaminante. Para el tratamiento de DBO<sub>5</sub> es adecuado un valor de 0,08 m/d (García, 2004).

C<sub>0</sub> (mg/L): concentración inicial del contaminante (afluente)

C<sub>1</sub> (mg/L): concentración final del contaminante (efluente)

Así pues, la superficie mínima del humedal necesaria para tratar el agua hasta los valores deseados es:

$$S = \frac{0,6}{0,08} \ln\left(\frac{80}{15}\right)$$

$$S = 7,5 \times \ln(5,3333) = 12,55 \text{ m}^2$$

A continuación se comprueba que esta superficie era suficiente también para reducir la DQO en valores inferiores al LMP correspondiente a este contaminante.

Para la DQO,  $C_0 = 160$  mg/L (propuesta) y  $C_1 = 40$  mg/L (según Ministerio de Ambiente).

$$S = \frac{0,6}{0,08} \ln\left(\frac{160}{40}\right) = 10,40 \text{ m}^2$$

Como la superficie necesaria para reducir la  $DBO_5$  es superior a la necesaria para reducir la DQO, se acepta como la superficie mínima que debería tener el humedal.

Finalmente, se comprueba que la carga orgánica superficial es menor de  $6 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2\text{d}$  según la metodología de García y Corzo (2008).

Si el valor obtenido resultase mayor, se debería incrementar la superficie para así cumplir este criterio.

$$\text{Carga orgánica superficial } (C_S) = \frac{Q \times C_0}{S}$$

$$\text{En este caso: } C_S = \frac{0,6 \times 80}{12,55} = 3,82 \frac{\text{g DBO}_5}{\text{m}^2\text{d}} < 6 \frac{\text{g DBO}_5}{\text{m}^2\text{d}}$$

Con esta verificación se aprueban las dimensiones mínimas calculadas para el humedal.

Este mismo dimensionamiento va a permitir reducir el nitrógeno en aproximadamente un 30-60% si el sistema se diseña con una profundidad media de la lámina de agua de 0,3 m (García y Corzo, 2008).

## Dimensionamiento hidráulico

El dimensionamiento hidráulico sirve para determinar las dimensiones del sistema (anchura y longitud) una vez conocida su superficie. El dimensionamiento hidráulico se realiza aplicando la Ley de Darcy, que describe el régimen del flujo en un medio poroso, mediante la siguiente ecuación (García y Corzo, 2008):

$$Q = k_s \cdot A_s \cdot s$$

Donde:

Q (m<sup>3</sup>/d): caudal medio diario.

k<sub>s</sub> (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d): conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo.

A<sub>s</sub> (m<sup>2</sup>): sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo.

s (m/m): gradiente hidráulico o pendiente (dh/dL).

La conductividad hidráulica varía en función de la cantidad y del tamaño de los huecos del medio granular utilizado. En la Tabla 6 se muestran órdenes de magnitud estimados de la conductividad hidráulica (k<sub>s</sub>) para algunos materiales granulares limpios que podrían utilizarse como sustrato en estos sistemas (García y Corzo, 2008).

Tipo de sustrato	Tamaño efectivo D <sub>10</sub> (mm)	Porosidad (%)	Conductividad hidráulica K <sub>s</sub> (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)
Arenas graduadas	2	28-32	100-1000
Arenas gravosas	8	30-35	500-5000
Gravas finas	16	35-38	1000-10 000
Gravas medianas	32	36-40	10 000-50 000
Rocas pequeñas	128	38-45	50 000-250 000

Tabla 6: órdenes de magnitud de k<sub>s</sub> en función del material granular utilizado como sustrato (Reed et al., 1995).

Los valores de la pendiente ( $s$ ) que se suelen utilizar varían en el rango de 0,01 a 0,02 m/m (Cooper *et al.*, 1996).

Para llevar a cabo el dimensionamiento hidráulico y teniendo en cuenta las características del humedal, se ha considerado una conductividad hidráulica de 500  $m^3/m^2 \cdot d$  (correspondiente a un diámetro de grava de 4 a 8 mm) y una pendiente de 0,02 m/m.

Así pues, la sección mínima del humedal perpendicular a la dirección del flujo ( $A_s$ ) debe ser:

$$A_s = \frac{Q}{k_s \cdot s} = \frac{0,6}{500 \cdot 0,02} = 0,06 \text{ m}^2$$

Calculada el área de la sección transversal ( $A_s$ ), y una vez fijada la profundidad ( $h$ ), se determina el ancho del humedal ( $W$ ). Adoptamos una profundidad de lámina de agua de 0,3 m para poder reducir también el nitrógeno como se ha comentado con anterioridad en el apartado de dimensionamiento biológico. Así, el ancho mínimo que debería tener el humedal es:

$$W = \frac{A_s}{h} = \frac{0,06}{0,3} = 0,2 \text{ m}$$

Conocido el ancho ( $W$ ) y teniendo en cuenta la superficie determinada con el dimensionamiento biológico ( $S$ ) se determina la longitud del sistema ( $L$ ):

$$L = \frac{S}{W} = \frac{12,55}{0,2} = 62,77 \text{ m}$$

Teóricamente, el ancho del humedal calculado es suficiente para evitar problemas hidráulicos. Estos problemas se darían únicamente si el humedal fuera construido más estrecho de 0,2 m y se podrían solucionar construyendo sistemas paralelos.

La topografía de la zona no permite la construcción del humedal con estas dimensiones, así que se diseñará con dimensiones alternativas respetando el área de la sección transversal ( $A_s$ ) mínima y las demás características calculadas anteriormente.

Suponemos una relación largo:ancho del humedal de 2. Para el correcto funcionamiento del sistema, este valor se puede aumentar hasta 4 dependiendo de la topografía de la zona y de las posibilidades *in-situ* (García y Corzo, 2008).

Hemos calculado en el dimensionamiento biológico que la superficie mínima que debe tener el humedal es de  $12,55 \text{ m}^2$ , que corresponde al producto entre el ancho y el largo del humedal. Suponiendo que  $L = 2W$  y substituyendo las dos ecuaciones:

$$S = L \cdot W, \text{ donde } L = 2 \cdot W$$

$$S = 2 \cdot W^2$$

$$W = \sqrt{\frac{S}{2}} = \sqrt{\frac{12,55}{2}} = 2,5 \text{ m}$$

Conocida la anchura (W), calculamos la longitud del humedal construido (L):

$$S = L \cdot W$$

$$L = \frac{S}{W} = \frac{12,55}{2,5} = 5,0 \text{ m}$$

El área de la nueva sección transversal ( $A_s$ ) es:

$$A_s = W \cdot h$$

$$A_s = 2,5 \cdot 0,3 = 0,75 \text{ m}^2$$

Como se ha calculado con anterioridad, el área mínima que debe tener la sección transversal es de  $0,06 \text{ m}^2$ . El nuevo valor obtenido para este parámetro es mayor, así que aceptamos como válidas estas dimensiones para el humedal construido.



## 4.2. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

### 4.2.1. Concepto

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de gestión medioambiental cuya finalidad es analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica, el impacto ambiental originado por un proceso/producto durante su ciclo de vida completo (Romero, 2016).

En la norma UNE-EN ISO 14040 (Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia), se define el Análisis de Ciclo de Vida como una técnica que trata los aspectos medioambientales y los impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto, mediante:

- La recopilación de un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema del producto (producto/proceso en estudio);
- La evaluación de los potenciales impactos medioambientales asociados con las entradas y salidas identificadas en el inventario;
- La interpretación de los resultados de las fases de análisis de inventario y evaluación de impacto de acuerdo con los objetivos del estudio.

### 4.2.2. Etapas del Ciclo de Vida

En el contexto del Análisis del Ciclo de Vida se incluye el estudio y la cuantificación de los impactos ambientales asociados a la vida de un producto, proceso o actividad. Consiste en el conjunto de las siguientes etapas: adquisición de materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida útil.

Cada una de estas etapas tiene asociados unos inputs (principalmente consumo de materias primas y energía) y unos outputs (esencialmente residuos y emisiones). En la figura siguiente se muestran las relaciones entre ellas.

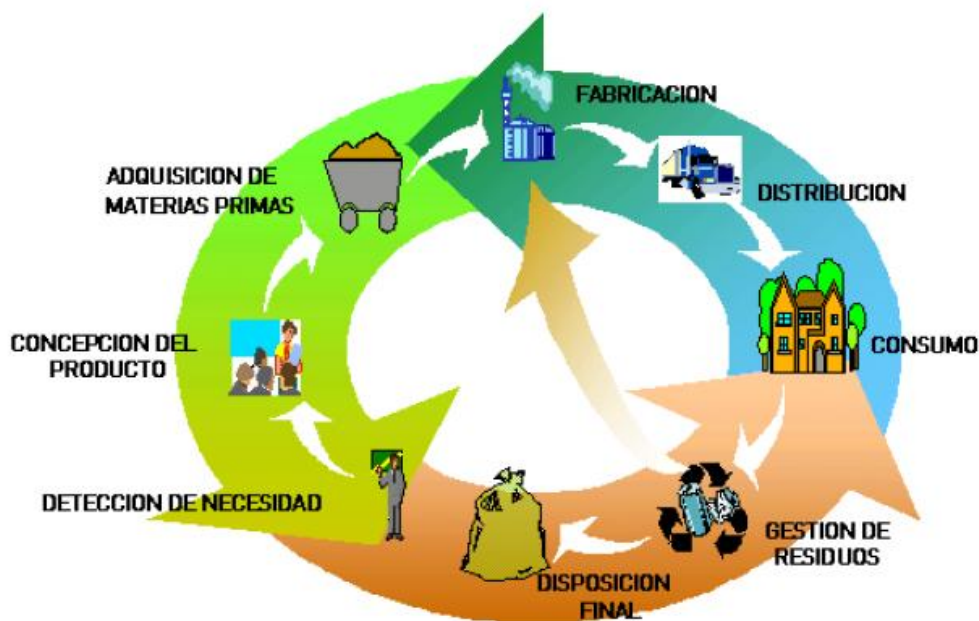


Figura 9: Relaciones entre las etapas del Ciclo de Vida (Romero, 2016).

A la vista de las etapas que conforman el ciclo de vida, es habitual encontrarse con alcances diferentes en el desarrollo de un ACV, siendo los más habituales:

- De la puerta a la puerta (Gate to gate): considera únicamente las actividades (proceso productivo) de la empresa a la que se aplica.
- De la cuna a la puerta (Cradle to gate): toma en consideración desde la extracción y acondicionamiento de materias primas hasta el proceso productivo de la empresa.

- De la puerta a la tumba (Gate to grave): considera el proceso productivo de la empresa y abarca hasta la fase de gestión de los residuos a que da lugar el producto.
- De la cuna a la tumba (Cradle to grave): estudia desde el acondicionamiento de las materias primas hasta la gestión última de los residuos (reciclaje u otros).
- De la cuna a la cuna (Cradle to cradle): considera el ciclo de vida completo del producto, ya que abarca desde el acondicionamiento de las materias primas hasta que el producto, tras quedar fuera de uso, es reintroducido en el mismo proceso productivo o en otro.

### 4.2.3. Etapas de desarrollo de un ACV

El desarrollo de un Análisis de Ciclo de Vida, de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 14040, debe cubrir las siguientes etapas metodológicas (Romero, 2016):

- **Etapas 1. Definición del Objetivo y Alcance del ACV.** En los objetivos se exponen los motivos por los que se desarrolla el estudio, la aplicación prevista y a quién va dirigido. El alcance consiste en la definición de la amplitud, profundidad y detalle del estudio.
- **Etapas 2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida.** Esta fase incluye la identificación y cuantificación de las entradas (consumo de recursos) y salidas (emisiones al aire, suelo y aguas y generación de residuos) del sistema del producto. Por sistema del producto se entiende el conjunto de procesos unitarios conectados material y energéticamente que realizan una o más funciones idénticas.
- **Etapas 3. Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida.** Durante esta etapa, utilizando los resultados del análisis de inventario, se evalúa la importancia de los potenciales impactos ambientales generados por las entradas y salidas del sistema del producto.

- **Etapa 4. Interpretación**, la cual incluye la combinación de los resultados de las dos etapas anteriores, con la finalidad de extraer, de acuerdo a los objetivos y alcance del estudio, conclusiones y recomendaciones que permitan la toma de decisiones.

En la figura siguiente se representan las fases que debe cubrir un ACV y las relaciones existentes entre las mismas.

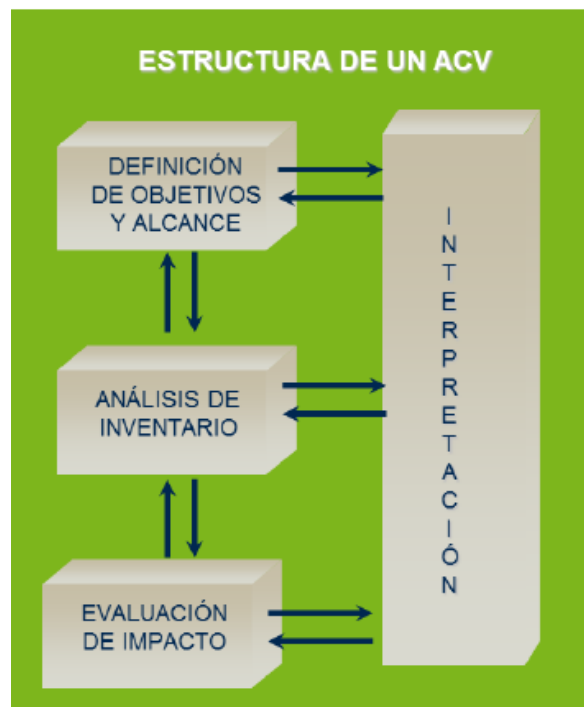


Figura 10: Etapas de un ACV (UNE-EN ISO 14040)

#### 4.2.4. Metodología

##### 4.2.4.1. Objetivo

El objetivo de este ACV es evaluar el impacto ambiental generado por la construcción y la operación de un sistema de tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas basado en un humedal construido. La principal función del sistema será el tratamiento del agua para su reutilización.

Estos resultados se compararán con el escenario actual, en la que el agua utilizada es bombeada desde una fuente lejana a la vivienda.

#### 4.2.4.2. Unidad funcional

La unidad funcional de este ACV se define como la producción de 1 litro de agua tratada.

#### 4.2.4.3. Alcance del ACV

Este estudio contempla los materiales necesarios para la construcción de las diferentes partes del sistema.

Para su operación no es necesario un gasto energético, pero se comparará con el escenario actual, en el que el agua utilizada proviene mediante un sistema de bombeo de una fuente lejana.

La superficie de terreno necesaria para la implementación del humedal construido es de 17,62 m<sup>2</sup>. Debido a las pequeñas dimensiones del sistema, la ocupación de terreno no se ha tenido en cuenta.

En este estudio no se ha contemplado la gestión de los lodos generados en la fosa séptica.

Se han considerado las emisiones directas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por parte del sistema. Éstas corresponden a las emisiones de CH<sub>4</sub> por parte de la fosa séptica y por parte del humedal.

El transporte de los materiales ha sido excluido del estudio.

La siguiente figura corresponde a un esquema donde se representan los límites del ACV.

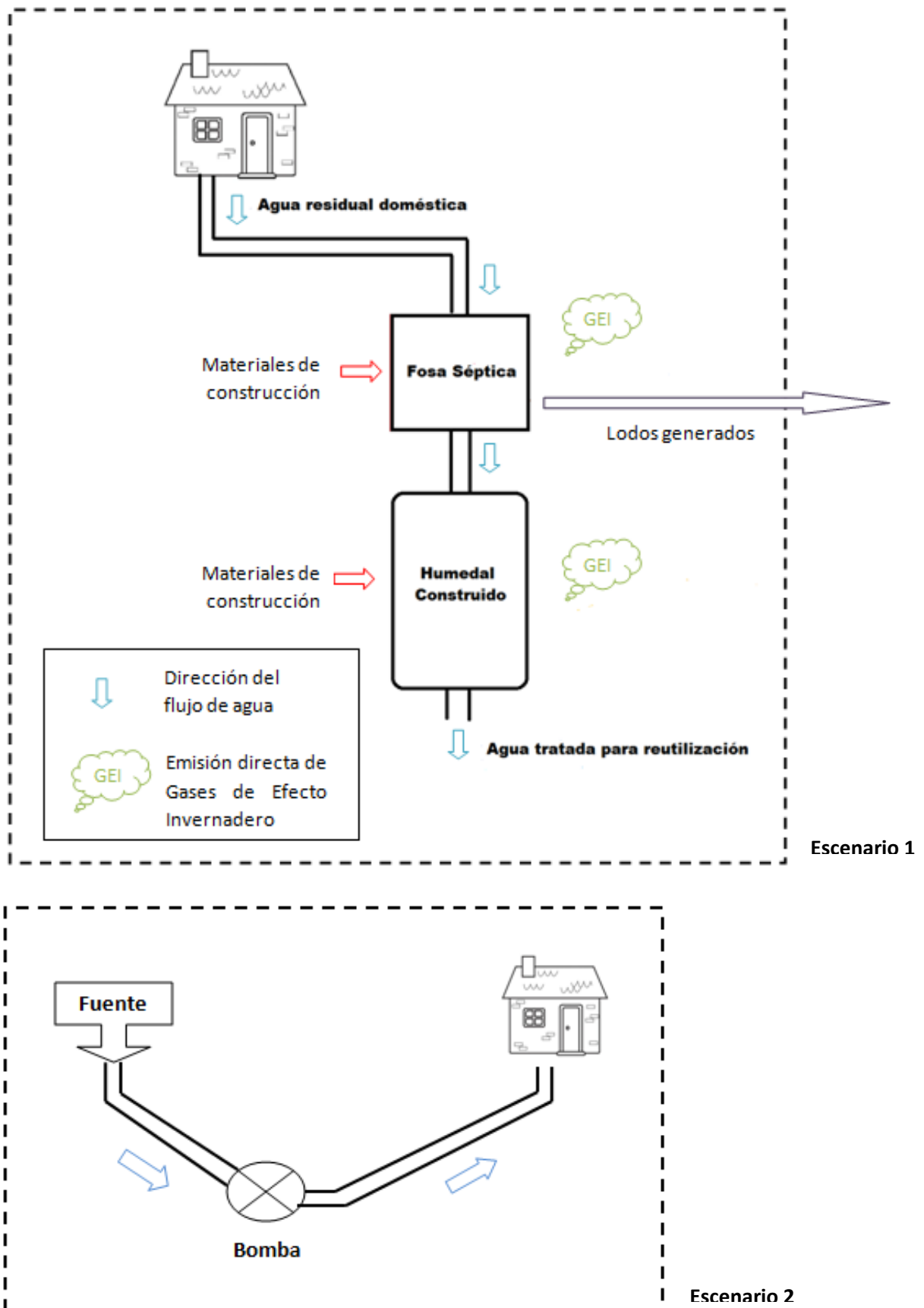


Figura 11: Límites del ACV (fuente propia)

#### 4.2.4.4. Metodología utilizada para el ACV

El Análisis de Ciclo de Vida se llevó a cabo utilizando el software SimaPro versión 8.2.3, un programa que permite modelar y analizar los ciclos de vida. Incluye varias bases de datos y métodos de evaluación de impactos.

Los datos del inventario han sido obtenidos a partir del diseño y dimensionamiento del sistema natural de tratamiento de aguas residuales domésticas. Una vez introducidos estos datos al programa, éste devuelve los resultados de las diferentes categorías de impacto. Todos los materiales y procesos están referidos a la Unidad Funcional (UF).

El método utilizado para la evaluación de los impactos generados por la construcción y operación del sistema es el método *ReCiPe Midpoint (H) V1.12*.

#### 4.2.4.5. Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

El Inventario del Ciclo de Vida está dividido en los dos diferentes escenarios que se quieren comparar: el del humedal construido (escenario 1) y el previo (escenario 2), que corresponde a la situación actual de abastecimiento de agua.

##### *Escenario 1*

En este escenario se evalúan los impactos ambientales generados por la construcción e implementación de un sistema natural de tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas previamente diseñado. El agua una vez tratada podrá ser utilizada para el riego de vegetales y/o para bebida de animales. En él se han valorado los siguientes apartados:

##### **Materiales de construcción**

Corresponde a todos los materiales necesarios para la construcción del sistema. Esta sección se divide en los siguientes apartados:

- **Fosa Séptica**

Para la construcción del tratamiento primario se han considerado los siguientes materiales: ladrillos, hormigón, refuerzos, chimeneas, alambre y clavos.

- **Humedal Construido**

Para la construcción del tratamiento secundario se han considerado los siguientes materiales: geomembrana, grava, arena y tubos para el sistema de alimentación.

- **Tuberías**

Incluye los tubos y sus respectivas conexiones que son necesarias para conducir el agua desde la vivienda hasta el tratamiento primario y secundario.

### **Emisiones directas de GEI**

Este apartado considera las emisiones directas de Gases de Efecto Invernadero que produce el sistema (biogás).

En la fosa séptica se genera CH<sub>4</sub> (12,27 g/m<sup>3</sup> agua tratada) (López, 2008).

En el humedal construido se genera CH<sub>4</sub> (10,89 g/m<sup>3</sup> agua tratada) (Corbella *et al.*, 2014).

El tratamiento de aguas residuales también produce CO<sub>2</sub>, pero éste es de origen biogénico y, por lo tanto, no se incluye como un elemento a declarar en este sector (ASEGRE, 2010).

El biogás producido es compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, así que no se han considerado en el estudio otros gases generados en menor escala como, por ejemplo, los óxidos de nitrógeno.

## **Escenario 2**

En este escenario se evalúan los impactos ambientales generados por la conducción de agua desde una fuente lejana hasta la vivienda mediante un sistema de bombeo. Se trata de la situación actual, donde una bomba consume energía eléctrica para que la familia pueda regar y dar de beber a los animales. Es, pues, el escenario previo a la implementación del humedal construido.

Para poder evaluar los impactos, se ha considerado que el sistema de bombeo está compuesto por una bomba SACI® HT 50-2 C.500 con una potencia de 1,5 kW y por las tuberías necesarias para conducir el agua desde la fuente hasta la vivienda.



Para llevar a cabo el estudio y comparación de ambos escenarios se ha tenido en cuenta que:

- El sistema funciona 365 días/año.
- El caudal utilizado corresponde al caudal medio diario (0,6 m<sup>3</sup>/día).
- La vida útil de la bomba es de 10 años. Para los demás materiales se ha considerado una vida útil de 20 años.

#### 4.2.4.6. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida

##### Selección de las categorías de impacto

Se indican qué categorías de impacto se incluyen en el estudio de ACV con sus respectivos indicadores de categoría. En este estudio se han tenido en consideración:

- **Agotamiento de metal**  
Se basa en la extracción y uso de metales. Se determina para cada extracción de mineral en función de las reservas y de la tasa de decrecimiento del elemento.  
Indicador de categoría: kg Fe eq.
- **Agotamiento de combustibles fósiles**  
Se basa en la extracción y uso de todos los combustibles fósiles. Se ha escogido esta categoría de impacto porque se considera que los combustibles fósiles pueden llegar a ser completamente sustituibles.  
Indicador de categoría: kg aceite eq.
- **Cambio climático**  
El cambio climático es un cambio en la distribución estadística de los patrones meteorológicos durante un periodo prolongado de tiempo (Moncada, 2010).  
Se basa en la capacidad de absorción de calor de cada gas en relación con la del dióxido de carbono.  
Indicador de categoría: kg CO<sub>2</sub> eq.

- **Disminución de la capa de ozono**

Este deterioro permite que grandes cantidades de rayos B ultravioleta alcancen la Tierra lo que puede provocar cáncer de piel y cataratas en humanos y dañar a los animales. Un exceso de radiación B ultravioleta que llegue a la Tierra también inhibe el ciclo del fitoplancton, organismos unicelulares como las algas que componen el último eslabón de la cadena alimenticia (Moncada, 2010).

Indicador de categoría: kg CFC-11 eq.

- **Acidificación terrestre**

Se define como la alteración de la composición química y pérdida de la capacidad neutralizante del suelo. El exceso de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  o  $\text{NH}_4^+$  disminuye el pH del medio.

Indicador de categoría: kg  $\text{SO}_2$  eq.

- **Eutrofización**

Se considera eutrofizado aquel ecosistema o ambiente caracterizado por una abundancia anormalmente alta de nutrientes (N y P procedentes de actividades humanas), de forma que se produce una proliferación descontrolada de algas. Éstas forman una capa en la superficie que impide el paso de la luz solar y la fotosíntesis por debajo de ellas, por lo que la producción primaria no puede existir a mayores profundidades (Porto *et al.*, 1991).

#### **Eutrofización de agua dulce**

Aportación de nutrientes procedentes de actividades humanas a un ecosistema de agua dulce hasta ser considerado eutrofizado.

Indicador de categoría: kg P eq.

#### **Eutrofización marina**

Aportación de nutrientes procedentes de actividades humanas a un ecosistema marino hasta ser considerado eutrofizado.

Indicador de categoría: kg N eq.

- **Formación de oxidantes fotoquímicos**

Los oxidantes fotoquímicos son contaminantes formados por la quema de combustibles y solventes. Reciben este nombre porque son productos de las reacciones entre los óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. La reacción ocurre en presencia de luz solar, de ahí el uso del término fotoquímico.

Indicador de categoría: kg NMVOC

- **Formación de materia particulada**

Esta materia dispersa en la atmósfera es generada por alguna actividad antropogénica (como la quema de carbón) o natural (actividad volcánica). Estas partículas afectan sobre el equilibrio de la radiación terrestre y tienen efectos nocivos para la salud (las partículas penetran en los pulmones, los bloquean y evitan el paso de aire).

Indicador de categoría: kg PM10 eq.

## **5. Resultados y discusión**

## 5.1. Diseño del sistema

Partiendo de las características iniciales y siguiendo la metodología propuesta por García y Corzo (2008), se ha diseñado un sistema natural de tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas. Éste está formado por una fosa séptica y por un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal con las siguientes dimensiones:

### Fosa Séptica

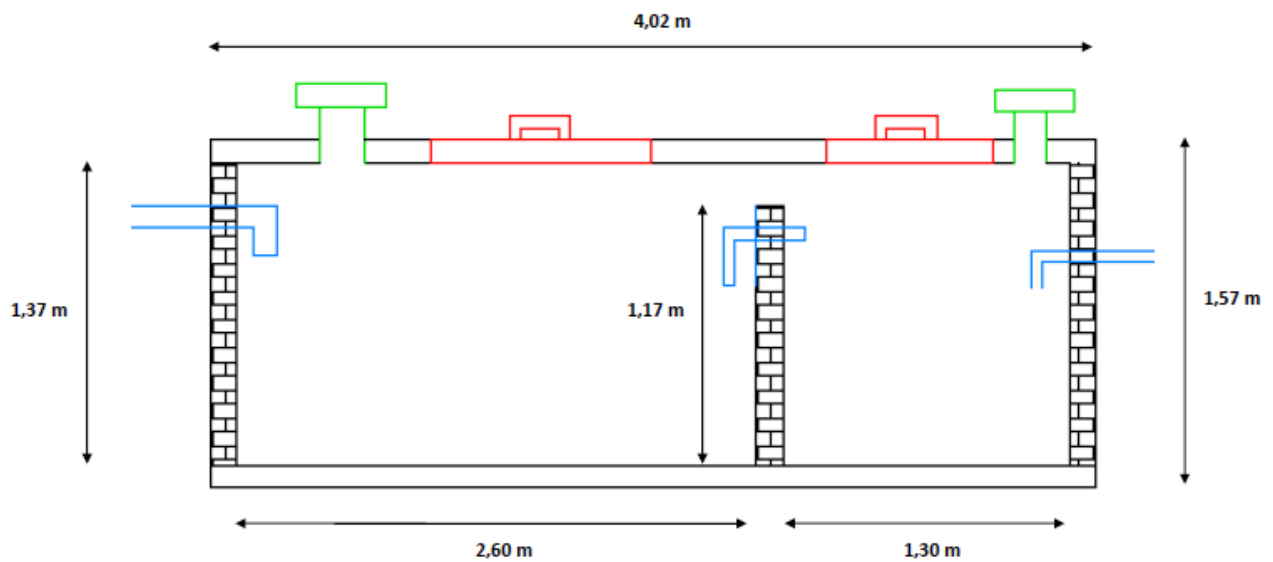


Figura 12: Diseño de la fosa séptica en alzado (fuente propia)

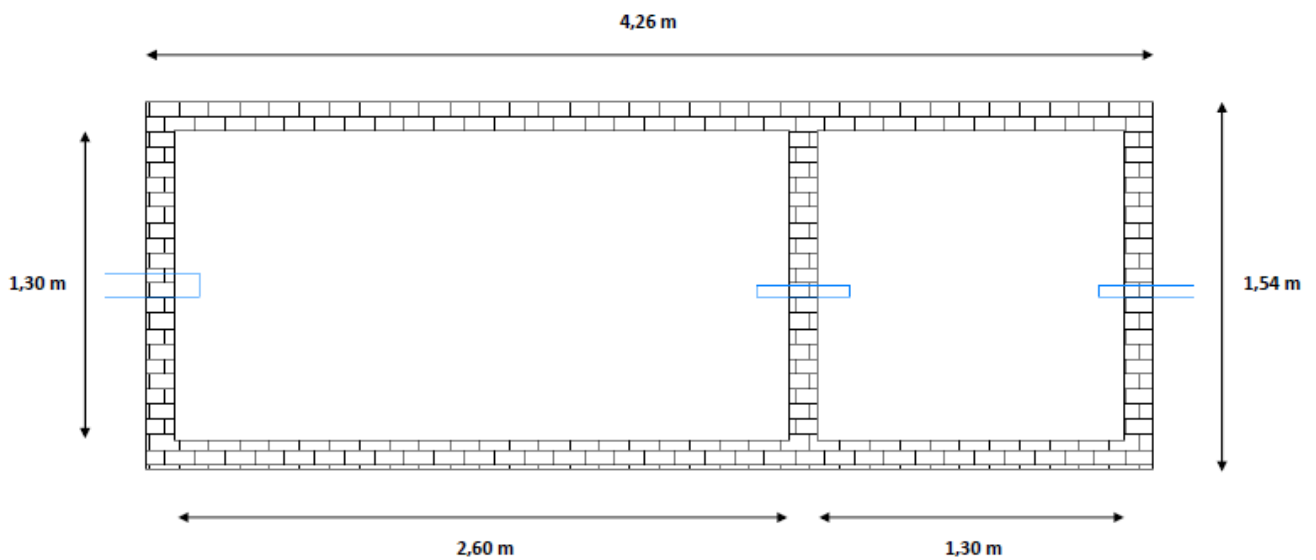


Figura 13: Diseño de la fosa séptica en planta (fuente propia)

**Humedal construido de flujo subsuperficial horizontal**

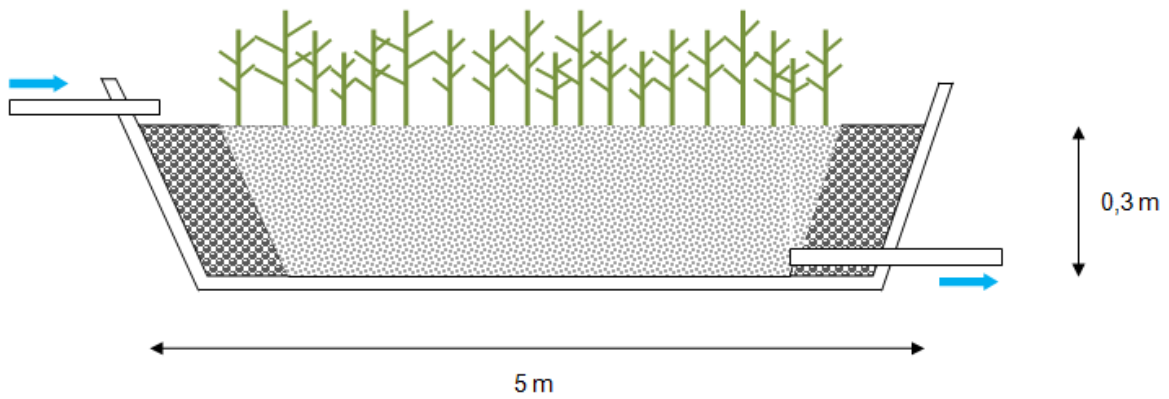


Figura 14: Diseño del humedal construido en alzado (fuente propia)

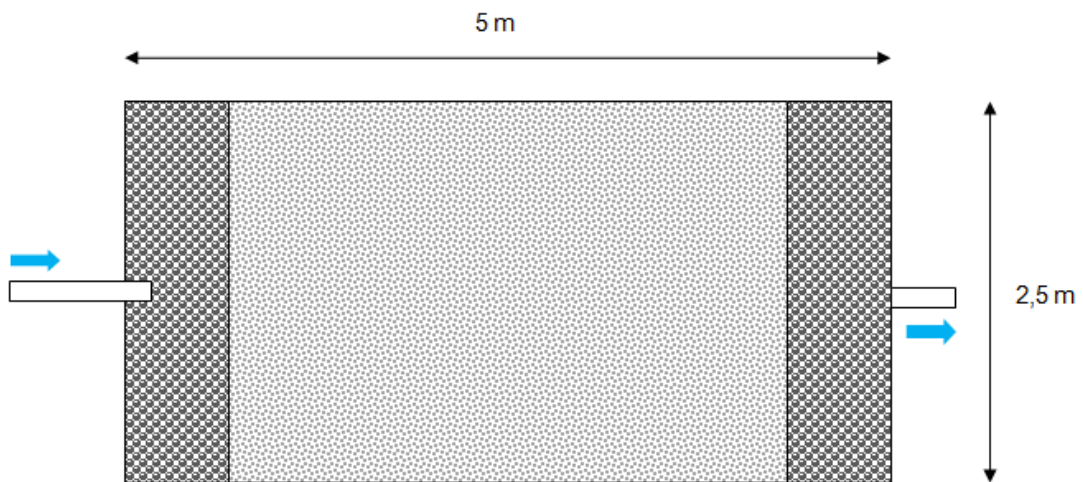






Figura 15: Diseño del humedal construido en planta (fuente propia)

-  Dirección del flujo del agua
-  Vegetación del humedal
-  Lecho filtrante principal de grava
-  Cuerpo de piedra gruesa para distribución del caudal

## 5.2. Inventario del ACV

Para poder obtener resultados de las diferentes categorías de impacto generadas por los dos escenarios se han establecido las siguientes características del sistema:

<b>Unidad Funcional (UF)</b>	1	L de agua tratada
<b>Período de tiempo</b>	20	años
<b>Caudal agua</b>	600	L/día
<b>Agua tratada en 1 año</b>	219000	L/año

Tabla 7: Características del sistema

Para realizar el Análisis del Ciclo de Vida del escenario 1 se tuvieron en cuenta todos los materiales necesarios para la construcción y la emisión directa de GEI por parte del sistema atendiendo a sus características y dimensiones. Estos datos del inventario quedan reflejados en las tablas 8 y 9 respectivamente.

Tabla 8: Inventario de materiales escenario 1

Ítem	Cantidad	Unidad	Unidades SimaPro	Vida útil	Cantidad/UF
<b>Fosa séptica</b>					
Ladrillos	1403,6	Kg	Kg	20	0,000320457
Hormigón	0,671875	m3	m3	20	1,53396E-07
Refuerzos (acero)	45	Kg	kg	20	1,0274E-05
Chimeneas (acero)	2	kg	kg	20	4,56621E-07
Alambre (hierro)	1	Kg	kg	20	2,28311E-07
Clavos (acero)	1	Kg	kg	20	2,28311E-07
<b>Humedal Construido</b>					
Geomembrana	9,405	kg	kg	20	2,14726E-06
<b>Medio granular</b>					
Grava	5647,5	kg	kg	20	0,001289384
Arena	1945,25	kg	kg	20	0,000444121
Sistema de alimentación (tubos de PVC)	6	kg	kg	20	1,36986E-06
<b>Tuberías</b>					
Tubos (PVC)	30	kg	kg	20	6,84932E-06
Conexión de tubos (PVC)	10	kg	kg	20	2,28311E-06

Tabla 9: Inventario de emisiones directas de GEI escenario 1

Item	Cantidad	Unidad	Unidades SimaPro	Vida útil	Cantidad/UF
CH4 (humedal construido)	0,01089	g	g	-	0,01089
CH4 (fosa séptica)	0,01227	g	g	-	0,01227

Para realizar el Análisis del Ciclo de Vida del escenario 2 se tuvieron en cuenta los materiales utilizados para bombear el agua y el consumo eléctrico por parte de la bomba. Estos datos del inventario quedan reflejados en la tabla 10.

Ítem	Cantidad	Unidad	Unidades SimaPro	Vida útil	Cantidad/UF
Energía (bombeo)	36	KWh	KWh	-	0,06
Bomba	10	kg	kg	10	4,56621E-06
Tubos (PVC)	20	kg	kg	20	4,56621E-06
Conexiones tubos (PVC)	3	kg	kg	20	6,84932E-07
Agua bombeada	1	m3	m3	-	1

Tabla 10: Inventario del escenario 2



### 5.3. ACV del escenario 1

Partiendo de los datos del inventario del ACV para el escenario 1, se han obtenido los siguientes resultados para las diferentes categorías de impacto. Su representación gráfica se muestra en el Anexo 2 en las figuras de 1-1 a 1-9.

#### **Cambio climático**

El impacto total generado es de  $6,857 \times 10^{-4}$  kg CO<sub>2</sub> eq. Esta cantidad procede mayoritariamente de la emisión de gases de efecto invernadero generados en el sistema, representando un 71,55% del total del impacto. El segundo factor que más repercute en esta categoría es la construcción de la fosa séptica, a la que se atribuye un 18,94% del impacto debido mayoritariamente a la utilización de ladrillos y hormigón. Con menos repercusión encontramos la construcción del humedal y el uso de tuberías para la alimentación del sistema (5,54% y 3,98% del total respectivamente) (Anexo 2, figura 1-1).

#### **Disminución de la capa de ozono**

El impacto total generado es de  $1,204 \times 10^{-11}$  kg CFC-11 eq. La construcción de la fosa séptica es el factor que más repercute en esta categoría contribuyendo con el 67,26% del total del impacto. Esto se debe a la utilización de ladrillos y, en menor medida, de hormigón. La construcción del humedal genera un impacto menor representando el 29,53% del total. Este impacto es generado mayoritariamente por la cantidad de grava necesaria. La utilización de tubos genera únicamente el 3,21% del total, mientras que las emisiones de gases del sistema no repercuten en esta categoría de impacto (Anexo 2, figura 1-2).

#### **Acidificación terrestre**

El impacto total generado es de  $7,021 \times 10^{-7}$  kg SO<sub>2</sub> eq. En esta categoría el factor que más contribuye es la construcción de la fosa séptica, aportando un 60,62% del total. Los ladrillos, el hormigón y los refuerzos utilizados hacen que esta construcción sea el factor que más impacto genera dentro de la categoría. En segundo lugar se encuentra la construcción del humedal, con un 27,77% del total generado. Este valor se le atribuye mayoritariamente por la cantidad de grava necesaria. Los tubos utilizados en el sistema aportan un 11,60% del conjunto. En esta categoría, las emisiones de gases de efecto invernadero no contribuyen al impacto generado (Anexo 2, figura 1-3).

### **Eutrofización de agua dulce**

El impacto total generado es de  $4,762 \times 10^{-8}$  kg P eq. Dentro de esta categoría observamos la construcción de la fosa séptica como factor que sobresale en la generación del impacto con casi tres cuartas partes del total (71,97%). Esto es debido mayoritariamente a los refuerzos utilizados durante la construcción. Lejos de estos valores observamos la construcción del humedal como segundo factor que más afecta a esta categoría con un 21,19% sobre el total. La grava es el material del humedal que más influye en la generación de este impacto. Por último encontramos el sistema de tuberías con un 6,84% respecto al total. En esta categoría, la emisión de gases de efecto invernadero no genera impacto (Anexo 2, figura 1-4).

### **Eutrofización marina**

El impacto total generado es de  $3,119 \times 10^{-8}$  kg N eq. Observamos que en esta categoría el impacto está más repartido entre los diferentes factores que en la eutrofización de agua dulce. Aún así, más de la mitad del total recae en la construcción de la fosa séptica (57,96%) debido a la utilización de ladrillos y, en menor escala, de hormigón y de refuerzos. El segundo factor que más impacto genera es la construcción del humedal (28,13% respecto el total) debido mayoritariamente a la cantidad de grava necesaria. Por último observamos que las tuberías generan un 13,92% del total y que las emisiones de gases de efecto invernadero no generan impacto para esta categoría (Anexo 2, figura 1-5).

### **Formación de oxidantes fotoquímicos**

El impacto total generado es de  $9,326 \times 10^{-7}$  kg NMVOC. El 41,46% de este total es generado por la construcción de la fosa séptica debido a la utilización de ladrillos, hormigón y refuerzos en menor escala. La emisión de gases de efecto invernadero en el sistema es el segundo factor que más impacto genera en esta categoría, representando casi una cuarta parte del total (23,83%). Seguidamente observamos la construcción del humedal con un 22,06% del total debido mayoritariamente a la cantidad de grava utilizada. Por último encontramos el sistema de tuberías como factor de menor relevancia para esta categoría representando un 12,66% del total (Anexo 2, figura 1-6).

### **Formación de materia particulada**

El impacto total generado es de  $3,776 \times 10^{-7}$  kg PM10 eq. Cerca de dos terceras partes de este total recaen en la construcción de la fosa séptica (64,20%). Esto es debido a la utilización de ladrillos y refuerzos y, en menor escala, de hormigón. La construcción del humedal contribuye con un 26,87% debido a la cantidad de grava necesaria. Por último encontramos el sistema de tuberías que aporta un 8,93% del total del impacto generado. Las emisiones de gases de efecto invernadero por parte del sistema no repercuten en esta categoría de impacto (Anexo 2, figura 1-7).

### **Agotamiento de metal**

El impacto total generado es de  $3,987 \times 10^{-5}$  kg Fe eq. No cabe duda que en esta categoría el factor más relevante es la construcción de la fosa séptica, acercándose a la totalidad del impacto generado (93,50%). Esta gran contribución al impacto recae en la cantidad de refuerzos necesarios para la construcción. Muy lejos de estos valores encontramos la construcción del humedal con un 5,86% respecto del total por la grava utilizada. Casi menospreciable observamos el sistema de tuberías que únicamente contribuye al impacto con un 0,64% respecto del total. Para esta categoría, las emisiones de gases de efecto invernadero no generan impacto (Anexo 2, figura 1-8).

### **Agotamiento de combustibles fósiles**

El impacto total generado es de  $4,879 \times 10^{-5}$  kg aceite eq. Cerca de la mitad del impacto es generado durante la construcción de la fosa séptica (46,01%) debido a la utilización de ladrillos y, en menor escala, de hormigón y de refuerzos. Tanto la construcción del humedal como el sistema de tuberías repercuten de forma similar al impacto generado en esta categoría, representando un 29,02% del total la construcción del humedal y un 24,97% del total el sistema de tuberías. La emisión de gases de efecto invernadero no genera impacto para esta categoría (Anexo 2, figura 1-9).

## Comentario de los resultados

En resumen, los materiales necesarios para la construcción de la fosa séptica son los factores que más repercuten en el impacto de la mayoría de categorías exceptuando el cambio climático, donde la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es el factor que más impacto genera dentro de esta categoría.

Sin tener en cuenta la categoría de cambio climático que diverge del resto, estos materiales representan del 41,46 al 93,50% del impacto total generado en todas las categorías estudiadas. Esto es debido mayoritariamente a la cantidad de ladrillos necesarios para la construcción de la fosa séptica. Únicamente en las categorías de agotamiento de metal y de eutrofización de agua dulce, los refuerzos son el material que más impacto genera.

La construcción del humedal es el segundo factor que más impacto genera en la mayoría de categorías estudiadas. Exceptuando el cambio climático y el agotamiento de metal, los materiales necesarios para la construcción del humedal representan de un 22,06 a un 29,53% del total de impacto generado en las categorías estudiadas. Dentro de esta construcción, la grava es el material que más impacto genera en todas las categorías que se han tenido en cuenta en este estudio.

Exceptuando la emisión de gases, el sistema de tuberías ha sido el factor que menos impacto ha generado en todas las categorías estudiadas. Este valor representa del 0,64 al 24,97% del total de las diferentes categorías.

La emisión de gases de efecto invernadero por parte del sistema solamente ha generado impacto en las categorías de cambio climático (donde ha sido el factor que más ha repercutido dentro de esta categoría) y de formación de oxidantes fotoquímicos, representando un 71,55% y un 23,83% del total respectivamente.

## 5.4. ACV del escenario 2

Partiendo de los datos del inventario del ACV para el escenario 2, se han obtenido los siguientes resultados para las diferentes categorías de impacto. Su representación gráfica se muestra en el Anexo 2, figuras de 2-1 a 2-9.

### **Cambio climático**

El impacto total generado es de 0,048 kg CO<sub>2</sub> eq. Prácticamente la totalidad de este valor proviene del impacto generado por el consumo eléctrico por parte de la bomba, representando un 99,96% sobre esta categoría. La bomba y las tuberías utilizadas representan por igual un 0,02% sobre el total del impacto (Anexo 2, figura 2-1).

### **Disminución de la capa de ozono**

El impacto total generado es de  $2,438 \times 10^{-9}$  kg CFC-11 eq. El consumo eléctrico del sistema de bombeo genera el 99,97% de este valor. Únicamente un 0,02% del total es aportado por la bomba y un 0,01% por las tuberías utilizadas (Anexo 2, figura 2-2).

### **Acidificación terrestre**

El impacto total generado es de  $2,261 \times 10^{-4}$  kg SO<sub>2</sub> eq. Este valor se le atribuye casi por completo al consumo eléctrico por parte de la bomba, que genera el 99,97% del impacto total en esta categoría. El valor restante es generado por la bomba y las tuberías utilizadas, que contribuyen con un 0,01% y un 0,02% respectivamente del total (Anexo 2, figura 2-3).

### **Eutrofización de agua dulce**

El impacto total generado es de  $2,744 \times 10^{-5}$  kg P eq. Prácticamente la totalidad de este valor proviene del impacto generado por el consumo eléctrico por parte de la bomba, representando un 99,98% sobre esta categoría. La bomba y las tuberías utilizadas representan por igual un 0,01% sobre el total del impacto (Anexo 2, figura 2-4).

### **Eutrofización marina**

El impacto total generado es de  $1,066 \times 10^{-5}$  kg N eq. Únicamente el consumo eléctrico del sistema de bombeo ya contribuye con el 99,97% respecto el total generado. La bomba genera un 0,01% sobre el impacto total, mientras que las tuberías utilizadas, un 0,02% (Anexo 2, figura 2-5).

### **Formación de oxidantes fotoquímicos**

El impacto total generado es de  $1,219 \times 10^{-4}$  kg NMVOC. Un 99,92% de este valor es aportado por el consumo eléctrico por parte de la bomba. El impacto restante es generado por la bomba utilizada (0,03%) y por el sistema de tuberías (0,05%) (Anexo 2, figura 2-6).

### **Formación de materia particulada**

El impacto total generado es de  $1,625 \times 10^{-4}$  kg PM10 eq. Este valor se le atribuye casi por completo al consumo eléctrico por parte de la bomba, que genera el 99,97% del impacto total en esta categoría. El valor restante es generado por la bomba y las tuberías utilizadas, que contribuyen con un 0,01% y un 0,02% respectivamente del total (Anexo 2, figura 2-7).

### **Agotamiento de metal**

El impacto total generado es de  $9,149 \times 10^{-4}$  kg Fe eq. El 99,54% del impacto es generado por el consumo eléctrico del sistema de bombeo. La bomba contribuye con un 0,44% respecto del total y el sistema de tuberías, con un 0,02% (Anexo 2, figura 2-8).

### **Agotamiento de combustibles fósiles**

El impacto total generado es de 0,012 kg aceite eq. Únicamente el consumo eléctrico del sistema de bombeo ya contribuye con el 99,93% respecto el total generado. La bomba genera un 0,02% sobre el impacto total, mientras que las tuberías utilizadas, un 0,05% (Anexo 2, figura 2-9).

## Comentario de los resultados

Observando los resultados obtenidos del escenario 2, no cabe duda de cuál es el factor que más impacto genera dentro del sistema de bombeo.

Únicamente el consumo eléctrico por parte de la bomba genera entre el 99,92% y el 99,98% del total en todas las categorías de impacto estudiadas.

La bomba utilizada contribuye en el impacto total generado entre el 0,1% y el 0,03% en las diferentes categorías, exceptuando la categoría de agotamiento de metal, en la que aporta un 0,44% del total debido a que está hecha de hierro.

En relación al total, las tuberías utilizadas en el sistema de bombeo son el factor que menos impacto genera dentro del escenario 2. Éstas contribuyen entre un 0,1% y un 0,05% en las diferentes categorías estudiadas.

### 5.5. Comparación entre los dos escenarios

En este apartado se comparan los impactos generados en el escenario del humedal construido con los generados en el escenario previo en las diferentes categorías estudiadas. En este último se modela la situación actual, en la que el agua utilizada en la vivienda proviene de una fuente lejana mediante un sistema de bombeo.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos en los dos escenarios:

Comparación escenarios		
Categoría de Impacto	Escenario 1	Escenario 2
Cambio climático (kg CO2 eq)	0,000685707	0,048847114
Disminución de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)	1,20409E-11	2,43846E-09
Acidificación terrestre (kg SO2 eq)	7,02083E-07	0,000226148
Eutrofización de agua dulce (kg P eq)	4,76154E-08	2,74431E-05
Eutrofización marina (kg N eq)	3,11936E-08	1,06628E-05
Formación de oxidantes fotoquímicos (kg NMVOC)	9,32584E-07	0,00012191
Formación de materia particulada (kg PM10 eq)	3,77605E-07	0,000162526
Agotamiento de metal (kg Fe eq)	3,98737E-05	0,000914856
Agotamiento de combustibles fósiles (kg aceite eq)	4,87915E-05	0,012006821

Tabla 11: Resultados obtenidos de los escenarios

Estos resultados son claros: en todas las categorías estudiadas, el impacto generado en el escenario previo es vastamente mayor que el generado en el escenario del humedal construido, donde prácticamente todo el impacto proviene del consumo eléctrico por parte de la bomba.

Respecto a la situación actual de abastecimiento de agua en la vivienda, el impacto ambiental generado se reduce entre un 96% y un 99% en todas las categorías estudiadas con la construcción e implementación del sistema natural de tratamiento y reutilización de aguas residuales diseñado en el presente estudio.

En el Anexo 2 y de la figura 3-1 a la figura 3-9 se pueden observar estas diferencias representadas según las diferentes categorías de impacto estudiadas.



## **6. Conclusiones y recomendaciones**

## 6.1. Conclusiones

En el presente estudio se ha diseñado un sistema natural de tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas y se ha llevado a cabo una evaluación del impacto ambiental generado por el sistema utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Los datos utilizados en el inventario para llevar a cabo el estudio son resultado de un previo diseño y dimensionamiento del sistema necesario para tratar el agua hasta los niveles de contaminación deseados.

Los resultados obtenidos del escenario del humedal construido muestran que la mayor parte del impacto es generado en la construcción de la fosa séptica, donde la cantidad de ladrillos utilizados contribuye significativamente. Exceptuando la categoría de cambio climático, estos materiales representan del 41 al 93% del impacto total generado en las diferentes categorías.

La emisión de gases de efecto invernadero tiene un efecto directo sobre el cambio climático. Estos gases son generados en el sistema durante el proceso de tratamiento del agua y son emitidos directamente a la atmósfera. En esta categoría representan un 71% del total del impacto generado.

En los resultados obtenidos del escenario previo se puede observar que prácticamente todo el impacto generado proviene del consumo eléctrico por parte de la bomba.

Mediante la construcción e implementación del sistema natural de tratamiento y reutilización de aguas residuales diseñado, el impacto ambiental generado se vería reducido entre un 96% y un 99% en las diferentes categorías estudiadas.

## 6.2. Recomendaciones

Los humedales construidos son una tecnología que permite el tratamiento y reutilización de aguas residuales *in situ*, permitiendo así a la familia disponer de aguas de buena calidad en la vivienda sin necesidad de bombear agua de otras fuentes lejanas. Mediante estos sistemas, se transforman las aguas residuales en aguas aptas para diferentes usos como, por ejemplo, bebida para animales y riego de algunos cultivos.

Otra ventaja de los sistemas de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales es que pueden trabajar por gravedad. Es por ello que estos sistemas deberían ser diseñados para funcionar sin necesidad de consumir energía eléctrica o, si fuera necesario, que la electricidad utilizada proviniera de energías renovables.

Aunque estos sistemas se caracterizan por su fácil operación y mantenimiento, requieren de grandes áreas para su implementación. En este análisis se ha considerado que la ocupación de terreno no es un factor limitante. Si así fuera, se debería realizar un estudio que analizara otros sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales y compararlos con los sistemas de humedales construidos.

En este estudio no se ha tenido en cuenta el contexto socioeconómico del que se parte ni se ha aplicado una perspectiva de género. Según de Jong *et al.* (2013), garantizar el agua de buena calidad es fundamental para alcanzar la seguridad alimentaria y mejorar los medios de vida rurales en la mayor parte del mundo, especialmente en las zonas áridas o semiáridas. A pesar de que las mujeres desempeñan una función clave en la seguridad alimentaria, a menudo se ven excluidas de los procesos de toma de decisiones en los nuevos sistemas de gestión hídrica para usos agrícolas y otros proyectos e iniciativas sobre asignación de recursos naturales. No pueden elegir el tipo de servicios que reciben o el lugar en que tienen acceso a ellos. Garantizar el acceso seguro de las mujeres a agua de buena calidad es fundamental para lograr el Objetivo 1 de Desarrollo del Milenio (Reducir a la mitad la proporción de personas que viven en la pobreza extrema y que padecen hambre) y el Objetivo 3 (Promover la igualdad entre los géneros y el empoderamiento de la mujer).

Una evaluación social y económica con perspectiva de género complementaría este ACV para poder evaluar estas tecnologías desde un punto de vista multidisciplinario e incluyente.

## 7. Referencias

Arias, I.; Carlos, A.; Brix, H. (2003). *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. Universidad Militar Nueva Granada. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Bogotá, Colombia. pp. 17-24.

Brix, H. (1994). *The Role of Wetlands for the Control of Pollution in Rural Areas. Design and Use of Constructed Wetlands*. Curso CIHEAM-IAWQ. Zaragoza.

Brix, H. (1999). *How "Green" are aquaculture, constructed wetlands and conventional wastewater treatment systems?* Español (España, Internacional). *Water Science and Technology* 40 (3), 45-50.

Chung, B. (2013). *Situación actual y perspectivas en el sector agua y saneamiento en el Perú*. Autoridad Nacional del Agua (ANA). Lima, Perú.

Collado, R. (1992). *Depuración de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades*. Colección Seinor 12, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Editorial Paraninfo, Madrid, 128 pp.

Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B. y Shutes, R.B.E. (1996). *Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. WRc Swindon, UK. 184 pp.

Franceys, R. Pickford, J., Reed, R. (1992) *A Guide to the Development of on-Site Sanitation*. Macmillan/Clays. England.

García J., Aguirre P., Mujeriego R., Huang Y., Ortiz L. y Bayona, J. M. (2004). *Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater*. Español (España, Internacional) *Wat. Res.*, 38, 1669-1678.

García, J. and Corzo, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos: Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. Spain: Authors.

Hench, K., Bissonnette, G., Sexstone, A., Coleman, J. & Garbutt, K. (2003). *Fate of physical, and microbial contaminants in domestic waste water following treatment by small constructed Wetlands*. Inglés (Reino Unido). *Water Research* 37 (4), 921 – 927.

Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/36b0/438cf04d3a4b5db237b69bb04fab8a7e32f2.pdf>

Instituto Nacional de Estadística e Informática Perú (2015): *Anuario de Estadísticas Ambientales*. Disponible en: <http://www.inei.gob.pe/biblioineipub/bancopub/Est/Lib1037/Libro.pdf>. Último acceso abril 2018.

Kadlec, R.H., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., Haberl, R. (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. Inglés (Reino Unido). IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing, 155 pp.

Lara-Borrego J.A. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Tesis de maestría. Español (España, Internacional). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Leal, M.T. (2005). *Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones*. Español (España, Internacional). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec. Morelos, México.

Mariñelarena, A. (2006). *Manual de autoconstrucción de un sistema de tratamiento de aguas residuales domiciliarias - 1a edición*. Español (España, Internacional) FREPLATA editores. Buenos Aires, Argentina.

Metcalf & Eddy (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4th edition*. Inglés (Reino Unido). McGraw-Hill, Boston, USA.

Ministerio del Ambiente (2017): *Cifras ambientales*. Disponible en: <http://sinia.minam.gob.pe/index.php?accion=verElemento&idElementoInformacion=1276&idformula=>. Último acceso marzo 2018.

Muñoz Couto, R. (2009). *Uso de humedales para el tratamiento de aguas residuales municipales en el entorno de la Laguna de Tamiahua, Veracruz*. Español (España, Internacional). Tesis Licenciatura. Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla.

Organización Mundial de la Salud (OMS) (2014). *Water*. Media centre, Fact sheets. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/en/> (Último acceso mayo 2018).

Organización Mundial de la Salud (OMS) y UNICEF (2017). *Progreso del agua potable y saneamiento*. Español (España, Internacional). Switzerland: Author.

Porto, R.L.L.; Branco, S.M.; Cleary, R.W.; Coimbra, R.M.; Eiger, S.; Luca, S.J.; Nogueira, V.P.Q.; Porto, M.F.A. (1991). *Hidrología Ambiental*. 3a ed. Español (España, Internacional). Edusp, São Paulo, 414p.

Reed, S.C., Crites, R.W. y Middlebrooks, E.J. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. Second edition. Inglés (Reino Unido). McGraw Hill. 433 pp.

Romero, M.T. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Herramienta de gestión ambiental*. Español (España, Internacional). Tesis de Maestría. Escuela de Organización Industrial.

Selma, E.; Lloréns, M.; Del Riquelme, P. (2003). *Los recursos naturales de la región de Murcia. Un análisis interdisciplinar*. Español (España, Internacional). Universidad de Murcia. 1ª ed. UMSP. Murcia.

SERVINDI (2013). *La problemática del agua en Perú*. Disponible en: <https://www.servindi.org/actualidad/84511>. Último acceso mayo 2018.

Sistema de las Naciones Unidas en el Perú (2007). *Agua y recursos hídricos*. Disponible en: <http://www.onu.org.pe/Publico/infocus/agua.aspx>. Último acceso abril 2018.

