UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola Superior d'Agricultura de Barcelona

DESARROLLO DE UN ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS SOSTENIBLES PARA EL POSTRATAMIENTO DEL EFLUENTE DE BIODIGESTORES DE BAJO COSTE

Trabajo de Fin de Estudios

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Autora: Sandra Monteagudo Solà

Tutores: Mariana Garfí y Rubén Díez

29 de septiembre de 2020

RESUMEN

La implementación de biodigestores de bajo coste en países en vías de desarrollo, dan una oportunidad de aprovechamiento a aquellos residuos orgánicos procedentes de actividades agropecuarias de la zona. De esta manera, mediante la digestión anaerobia hay una producción de biogás que sirve de alternativa energética al consumo de otros combustibles tales como la leña o el gasoil, que producen afectaciones en la salud humana y al medioambiente.

Este proceso se lleva a cabo mediante una entrada con alimentación de estiércol de ganado fresco y agua al biodigestor. En la salida, se obtiene biogás como combustible y una descarga de digestado.

El digestado está compuesto por una fracción sólida y una fracción líquida. Ambas contienen una composición en nutrientes relevante para su uso como fertilizante orgánico. Sin embargo, existen limitaciones para su aplicación directa al suelo, ya que puede contener patógenos y otras sustancias nocivas para los cultivos, así como generar eutroficación y emisiones de gases de efecto invernadero, incumpliendo los requisitos establecidos por ley.

Por ello, es necesario tener en cuenta diferentes alternativas de postratamiento del digestado válidas para tratar el efluente del biodigestor, mejorando así su caracterización fisicoquímica, bioquímica y microbiológica.

En este proyecto, mediante la creación de una lista de criterios universales y la opinión de expertos y usuarios de diferentes ámbitos de trabajo, se evalúan distintas alternativas de postratamiento, a partir de una herramienta de Análisis Multicriterio (ACM).

El desarrollo e implementación de esta herramienta, ofrece información válida sobre los efectos que causa cada una de las alternativas de postratamiento en la geosfera y biosfera, la sociosfera y la actividad económica.

Con el objetivo de facilitar la toma de decisión para la evaluación de las alternativas de postratamiento del digestado aplicadas en un contexto rural, se requiere ponderar numéricamente los criterios universales según su importancia, a través de encuestas realizadas a expertos y usuarios del sector.

Por último, para comprobar la validez de la herramienta de Análisis Multicriterio, se aplica a dos casos reales, en los que se pretende seleccionar la tecnología de postratamiento del digestado más adecuada para dos comunidades rurales de Colombia.

ABSTRACT

The implementation of low cost biodigestors in developing countries give an exploitation opportunity to use those organic wastes originating from the agricultural activities of the area. Thus, the anaerobic digestion generates a biogas production that it is useful as an energetic alternative to the consumption of other fuels such as firewood and diesel oil that can produce affectations for the human health and the environment.

This process is carried out through an input of water and fresh cattle manure to the biodigestor. At the exit, we obtain biogas as a fuel and a digested unloading.

The digested it is composed by a solid and a liquid fraction. Both fractions have a relevant nutrients composition for their use as an organic fertilizer. However, there are limitations for its direct application to the soil because it can contain pathogens and other harmful substances for the crops and, at the same time, it can generate eutrification and greenhouse gas emissions, which violates the requirements established by law.

For this reason, it is necessary to count with different valid post treatment options of the digested to treat the effluent of the biodigestor, improving its physicochemical, biochemical and microbiological characteristics.

This project evaluates different alternatives of post treatments by means of a Multi-criteria Analysis, the creation of a universal criteria list and the opinion of the experts and users in their work environments.

The development and implementation of this tool offers a valid information about the effects that causes each post treatment alternatives in the geosphere, biosphere, sociosphere and the economic activity.

With the aim of facilitating the decision-making for the evaluation of the post treatment alternatives of the digested in a rural context, it is required to weigh numerically the universal criteria depending on their importance through surveys made by experts and users of the sector.

Finally, to check the validity of the multi-criteria tool, it is applied to two real cases where the intention is to select the most suitable digested's post treatment technology for the two rural Colombian communities.

SUMARIO

AGRADECIMIENTOS
1. INTRODUCCIÓN 5
2. OBJETIVOS 10
3. TECNOLOGÍAS DE POSTRATAMIENTO DEL DIGESTADO 11
3.1. TANQUE DE DESGASIFICACIÓN 11
3.2. FILTRO DE ARENA 12
3.3. VERMICOMPOSTAJE 13
3.4. RECIRCULACIÓN 14
3.5. MADURACIÓN AEROBIA 15
4. METODOLOGÍA UTILIZADA 16
4.1. DEFINICIÓN DE ASPECTOS, CRITERIOS Y SUBCRITERIOS 16
4.2. PONDERACIÓN DE CRITERIOS 17
4.3. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y AGREGACIÓN DE RESULTADOS 18
5. SELECCIÓN DE CRITERIOS 21
6. PONDERACIÓN DE CRITERIOS 26
6.1. RESULTADOS SEGÚN DIFERENCIACIÓN DE PERFILES 31
6.1.1. SEGÚN TIPO DE PERFIL PROFESIONAL 31
6.1.2. SEGÚN CONTEXTO DE TRABAJO CON BIODIGESTORES DE BAJO COSTE 33
7. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA 35
7.1. CASO ESTUDIO 1 37
7.1.1. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CASO DE ESTUDIO 1 38
7.1.2. INTRODUCCIÓN DE DATOS 39
7.1.3. OBTENCIÓN DE RESULTADOS 58
7.2. CASO ESTUDIO 2 66
7.2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CASO DE ESTUDIO 2 67
7.2.2. INTRODUCCIÓN DE DATOS 68
7.2.3. OBTENCIÓN DE RESULTADOS 81
8. CONCLUSIONES 88
9. BIBLIOGRAFÍA 90

ANEXOS

ANEXO I.ENCUESTA

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a Marianna Garfí y Rubén Díez, tutores del proyecto, que me han formado y orientado en todo momento. Gracias por la inmensa paciencia y la dedicación que he recibido por su parte. Este proyecto ha sido exitoso gracias a ellos.

A Ivet Ferrer, por las recomendaciones, los conocimientos y la predisposición a ayudarme. Gracias por facilitarme tanto el trabajo. El aprendizaje ha sido inmenso, al igual que gratificante.

Por último, dar las gracias en especial a mi familia, padres y hermanas, que me dan confianza y coraje para afrontar los retos planteados.

1. INTRODUCCIÓN

Los biodigestores son sistemas donde aprovechan los desechos orgánicos juntamente con agua, para mezclarlos en rectores y así a través de la digestión anaerobia donde la degradación de la materia orgánica mediante bacterias especificas en ausencia de oxígeno, producen dos productos principales: el biogás, compuesto principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), y en menor cantidades otros gases (H_2, H_2S, etc.), y el digestado compuesto por una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y otros compuestos de difícil degradación (IDAE, 2007). Estos subproductos se utilizan como fuentes de energía si las cantidades producidas son suficientemente elevadas.

El proceso por el cual se obtiene estos subproductos es mediante la digestión anaerobia realizada dentro del biodigestor. Este proceso está formado por varias etapas consecutivas de distinta complejidad siendo indispensables para la degradación del sustrato y la producción de biogás y efluente (Acosta, et al., 2005; Parra, 2015). En estas etapas intervienen varias poblaciones de microorganismos con distinta sensibilidad a cada una de ellas que degradan la materia orgánica en etapas sucesivas. Estas etapas son:

- Hidrólisis: transformación de materiales orgánicos solubles, complejos y no disueltos como lípidos, polisacáridos, proteínas, grasas y ácidos nucleicos, a compuestos orgánicos solubles susceptibles de emplearse como fuente de materia y energía para los microorganismos, mediante microorganismos anaerobios estrictos y baterías facultativas y fermentativas (Acosta, 2005).
- Acidogénesis: transformación de los compuestos orgánicos solubles de la primera etapa en ácidos orgánicos de cadena corta tales como acético, propiónico, butírico, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante diferentes bacterias facultativas y fermentativas (Acosta et al., 2005).
- Acetogénesis: transformación de los ácidos orgánicos de la etapa de acidogénesis en sustratos metanogénicos, ácidos grasos volátiles y alcoholes tales como acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante bacterias acetogénicas fermentativas (Acosta et al., 2005).
- Metanogénesis: transformación del acetato, hidrógeno y el dióxido de carbono a metano mediante baterías metanogénicas, bajo condiciones anaerobias estrictas fermentativas (Acosta et al., 2005).

Para que este proceso se desarrolle adecuadamente se deben regular una serie de parámetros ambientales tales como el pH, el potencial redox, los nutrientes, tóxicos e inhibidores, así como regular los parámetros operacionales de los digestores tales como la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, la carga orgánica volumétrica, para una digestión anaerobia exitosa.

Este proceso tiene una alta eficiencia de eliminación de carga orgánica, es por ello que uno de sus objetivos principales es valorizar energéticamente los residuos orgánicos mediante la producción de energía. Estos residuos orgánicos principalmente pueden tener orígenes ganaderos y agrícolas tales como purines, estiércol, excedentes, entre otros, que su uso ya conlleva la disponibilidad de nutrientes para el desarrollo adecuado de todo el proceso de digestión.

Así mismo, el uso de la energía producida en el proceso de digestión anaerobia evita la emisión de gases contaminantes a la atmosfera tales como el metano y el dióxido de carbono y las emisiones de olores a la atmosfera, ya que gran parte de los compuestos orgánicos volátiles responsables de malos olores son degradados en el proceso. Sin embargo, existe un riesgo de emisiones en el momento de descarga del efluente y durante su almacenamiento por lo que es necesario un postratamiento de este antes de aplicarlo al suelo agrícola.

Los biodigestores de bajo coste son una tecnología accesible para aquellas comunidades de pequeñas dimensiones que necesitan satisfacer sus necesidades energéticas de iluminación, cocción y electricidad (Garfí *et al.*, 2016). Al ser una tecnología que prescinde de mecanismos móviles de mezcla, tiene un bajo coste de inversión inicial así como de mantenimiento ya que el manejo de esta tecnología es sencillo.
El impacto que generan los biodigestores en zonas rurales, es muy alto puesto que una familia que disponga de aproximadamente 20 kg de estiércol y acceso a agua, puede incorporar un biodigestor de bajo coste obteniendo beneficios sociales que mejoran la salud familiar al no tener que conseguir y consumir combustible que obligan a las personas a realizar esfuerzos excesivos y a inhalar los humos contaminantes de los combustibles anteriormente utilizados (*RedBioLAC*, 2020).

Genera beneficios energéticos puesto que la producción de biogás, siendo una energía limpia, puede ser utilizada para cocinar, iluminar y calentar. Así mismo, la producción propia de digestado sirve como fertilizante orgánico mejorando así el rendimiento de los cultivos.

También genera beneficios ambientales puesto que reduce la presión sobre el entorno evitando la deforestación de alrededor de las comunidades debido al consumo de leña para cocinar. Así mismo, evita la contaminación por uso de agroquímicos al disponer de una producción propia de fertilizante natural y evita la emisión de gases contaminantes a la atmosfera, olores y focos de infección, por la captación de estos dentro del biodigestor (*RedBioLAC*, 2020).

Esta tecnología se ha implementado principalmente en países en desarrollo de Asia y actualmente en África y América Latina, gracias a programas de subsidio para la implementación de la tecnología.

Principalmente existen dos tipos de biodigestores:

1. Biodigestor de hormigón, que consiste en un modelo construido a partir de ladrillos o hormigón, completamente enterrado en el suelo. Consta de una cambra cilíndrica de mezcla del estiércol y agua, para realizar la digestión anaerobia y producir biogás, así como de un de depósito de compensación para el efluente de salida (Ferrer-martí *et al.*, 2018).

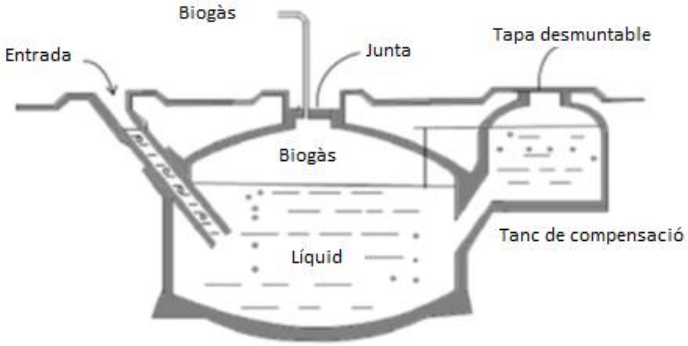

Figura 1.1. Esquema biodigestor de bajo coste de hormigón (Ferrer-martí *et al.*, 2018)

2. Biodigestor tubular de plástico, que consiste en un modelo construido a partir de polietileno o geomembrana, que se utiliza como una cámara herméticamente aislada, donde se mezcla el estiércol y el agua de entrada. Este biodigestor se deposita en una rasa cavada en la tierra para protegerlo del exterior y para mantener una temperatura adecuada. La mezcla se allá dentro de la cámara tubular y el biogás se almacena en el reservorio superior que se hincha en su producción (Ferrer-martí *et al.*, 2018).

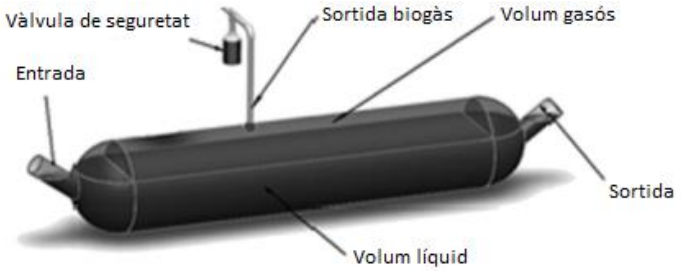

Figura 1.2. Esquema biodigestor de bajo coste tubular de plástico (Ferrer-martí *et al.*, 2018)

El biogás es producto de la digestión anaerobia dentro de los biodigestores, donde, de manera natural, se forma en la fermentación del estiércol junto con el agua.

En la degradación de la materia orgánica se producen distintos gases compuestos por un 50-70% de metano, un 30-50% de dióxido de carbono y trazas de otros gases tales como un 1-10% de hidrógeno, un < 3% de oxígeno, un < 1% de ácido sulfhídrico. Esta mezcla se la conoce como biogás (Acosta, 2005). Sin embargo, esta mezcla puede variar dependiendo del sustrato orgánico empleado para su producción y las condiciones en las que se procesa.

Su uso mayoritario es en calderas para generación de calor o electricidad, puesto que un biogás con un 65% de CH_4 y un 35% de CO_2 posee un alto poder calorífico de aproximadamente 7 Kwh/m³ (Varnedo, 2011). Su producción de energía térmica puede proporcionar un combustible renovable en aquellos lugares donde la obtención de combustibles fósiles es escasa o se produce un uso inadecuado de estos.

En sistemas de pequeña escala de producción de biogás se puede utilizar como iluminación utilizando la electricidad generada por el combustible.

De la digestión anaerobia también se obtiene el digestado como producto final de la digestión en biodigestores, que se produce en volumen similar al material inicial de digestión (Méndez et al. 2020).

Las características del digestado pueden variar mucho en función del origen y composición de la materia prima con la que se alimenta el biodigestor y las prácticas de manejo y las condiciones de operación del proceso de digestión (Garfí *et al.*, 2011). El efluente de salida del biodigestor puede ser un producto semisólido o líquido, con un alto contenido en agua. Sin embargo, la fracción líquida principalmente contiene mayor cantidad de nitrógeno y potasio que la fracción sólida que principalmente contiene una mayor cantidad de fósforo y fibras (Castro-Molano et al. 2019).

Durante el proceso de digestión anaerobia, el nitrógeno orgánico de las proteínas se hidroliza liberando nitrógeno amoniacal, que se encuentra en el digestado y el biogás. Ya que la

concentración de amoníaco tiende a aumentar del afluente al efluente, y el amoníaco es mucho más fácil de conseguir que el nitrógeno orgánico, el digestado parece más adecuado para ser utilizado como fertilizante orgánico de cultivos en comparación con el estiércol. (Garfí *et al.*, 2011).

Este producto es un fertilizante natural que puede sustituir los fertilizantes químicos, mejorando el rendimiento de las cosechas y actuando contra los insectos. Su alto contenido nutricional ayuda a regular el metabolismo de las plantas, promoviendo sus actividades fisiológicas. De este modo, favorece el desarrollo radicular aumentando y fortaleciendo el enraizamiento, así como el desarrollo foliar, aumentando su base foliar, y mejorando la floración y la producción de frutos. También puede ayudar a la tasa de germinación de semillas, estimulando su crecimiento y vigor. (*RedBioLAC*, 2020).

Contribuye a mantener la vida activa en el suelo ya que estimula el trabajo de los microorganismos presentes en él, aumentando su fertilidad.

Ayudar a incrementar la resistencia a plagas, enfermedades o desordenes de las plantas en su desarrollo fisiológico. A demás, reduce la quemadura de los tallos y hojas de las plantas, por degradación de los ácidos orgánicos, así como aumente la tolerancia a condiciones climáticas adversas de los cultivos (*RedBioLAC*, 2020).

Durante su uso y aplicación al suelo, las emisiones olorosas que produce son menores que las producidas por el estiércol o purines. Esto se debe a la degradación de los compuestos orgánicos volátiles en la fase de descomposición en el biodigestor. Sin embargo, no se eliminan al cien por cien y es preciso realizar análisis fisicoquímico y biológico al digestado para comprobar que su uso directamente al suelo no es perjudicial para los cultivos y el medio ambiente.

Si los análisis realizados sobre el digestado no cumplen con la normativa vigente del país sobre la aplicación de biosólidos en los cultivos, es preciso pretratar el digestado con una tecnología que ayude a minimizar el riesgo de contaminación ambiental y social descontrolada en la zona donde se quiera aplicar.

En muchas ocasiones es necesario tratar el digestado para disminuir la presencia de contaminantes patógenos y metales pesados que pueden estar presentes en el efluente del biodigestor y presentar inconvenientes a la hora de aplicarlo directamente al suelo como fertilizante orgánico (Castro-Molano et al. 2019).

Además, la cantidad de digerido que se produce diariamente en un biodigestor requiere de un almacenamiento previo a su aplicación en el suelo, debido a los requerimientos de fertilización de los cultivos. Es por ello que, su almacenaje puede ocasionar un riesgo para el medio ambiente y las comunidades de alrededor, debido a las emisiones incontroladas de gases contaminantes a la atmósfera como el metano, el dióxido de carbono, el amoníaco y el óxido nitros, por la degradación de la materia orgánica que no se ha realizado de forma completa dentro del biodigestor (Castro-Molano et al. 2019).

Por todo ello, es preciso conocer los parámetros operacionales del biodigestor y la calidad del digerido en función de sus características fisicoquímicas, bioquímicas y microbiológicas, para determinar si es necesario pretratar el digestado y que tecnología de postratamiento es necesaria aplicar antes de usar el digestado como fertilizante orgánico para los cultivos.

Así pues, para el postratamiento del digestado existen varias tecnologías que pueden resultar válidas para tratar el efluente del biodigestor. Sin embargo, escoger la opción más adecuada para tratar el digestado no es una tarea sencilla, puesto que hay varios factores que intervienen en la toma de decisión y dificultan el hallazgo la solución más adecuada.

Por ello, la toma de decisiones implica enfrentarse a situaciones en las que es necesario elegir entre múltiples opciones. Así pues es crucial ser consciente de los objetivos que se pretenden alcanzar así como de las consecuencias futuras de la decisión tomada. Por consiguiente, la búsqueda de la manera más eficiente de enfrentarse a dicho dilema es usar una herramienta de Análisis Multicriterio (MCA), que facilite la toma de decisiones (Álvaro *et al.*, 2017).

Por lo tanto, el Análisis Multicriterio es un método de toma de decisiones que a partir de varios criterios permite abordar problemas complejos que presentan alta incertidumbre de decisión (Wang *et al.*, 2020; Ferrer-martí *et al.*, 2018).

Durante el proceso de planificación, de acuerdo a la opinión de actores participantes, permite integrar varios criterios en un solo marco de análisis para ofrecer una visión integral del problema. De esta manera, permite orientar la toma de decisión llegando a la solución del problema mediante su simplificación (Wang *et al.*, 2020).

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo de una herramienta de Análisis Multicriterio que ayude en la elección de tecnologías sostenibles para el postratamiento del efluente (digestado) de biodigestores de bajo coste. La herramienta pretende ser una universal para su aplicación en zonas rurales de países de bajos recursos.

Para alcanzar este objetivo se pretende:

- Estudiar las diferentes alternativas de postratamiento del digestado en un contexto rural.

- Definir una lista de criterios y subcriterios universales para contextos rurales en países en desarrollo para la implementación del análisis multicriterio (AMC).

- Desarrollar una herramienta de apoyo a la toma de decisiones multicriterio para la evaluación de alternativas de postratamiento del digestado en zonas rurales.

- Desarrollar una encuesta para obtener la opinión de expertos y usurarios de la tecnología de biodigestores y el uso del digestado para poder ponderar los diferentes criterios según su importancia.

- Validar la herramienta de AMC utilizando dos casos de estudio reales en Colombia.

3. TECNOLOGÍAS DE POSTRATAMIENTO DEL DIGESTADO

Las tecnologías propuestas de postratamiento del digestado, pueden dar solución al impacto ambiental y social que genera el uso del digestado sin tratar directamente al suelo, dando como resultado un producto más sostenible.

En este proyecto se han considerado cinco tecnologías de postratamiento del digestado producido en biodigestores de bajo coste en un contexto de comunidades rurales: tanque de desgasificación, filtro de arena, vermicompostaje, recirculación y maduración aerobia.

Aunque estas tecnologías son usualmente empleadas en recuperación de aguas residuales, no existen muchas prácticas de implementación para el postratamiento del digestado. Así pues, la información de estas tecnologías esta recopilada en base a la recuperación de aguas residuales.

3.1. TANQUE DE DESGASIFICACIÓN

Tras el proceso de digestión anaerobia, el efluente líquido puede contener cantidades de metano disuelto. Si el potencial de biometanización del digestado es elevado, es importante tratar de recuperarlo para evitar su liberación al medio ambiente y así prevenir también la emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero. El control de las emisiones a la atmósfera también engloba las concentraciones de emisiones de compuestos responsables de olores característicos de la degradación de la materia orgánica, como los ácidos grasos volátiles (AGV)(Chiva-Vicent *et al.*, 2018).

En consecuencia, para la recuperación de metano residual disuelto que todavía posee el digestado y la prevención de emisiones a la atmosfera, es posible utilizar un tanque de desgasificación ubicado a la salida del digestor. Este proporciona un potencial de recuperación de metano debido a su facilidad de operación y su alta transferencia de masa.

El tanque de desgasificación es una tecnología de bajo coste que debe de ser construido con materiales impermeables que aseguren la estanqueidad, evitando la filtración del digerido y la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Se requiere de un tanque de polietileno cerrado herméticamente para evitar aportes de agua de lluvia que aumentaría el volumen y reduciría la concentración de los elementos fertilizantes del digestado (Bernal-Calderón et al., 2014). Este tanque se instala a la salida del biodigestor donde, a través de una tubería de polietileno sale el digestado líquido para entrar en el tanque de desgasificación. Su permanencia dentro del tanque de desgasificación ayuda a recuperar el biogás que no se ha recuperado en el digestor y al control de las emisiones de gases contaminantes (Brusi et al., 2017). Una vez pasado el tiempo necesario en el tanque de desgasificación, el efluente líquido es apto para su aplicación al suelo agrícola.

La gestión del digestado exige un periodo de almacenamiento asegurando su estabilidad y calidad, para después poder ser aplicado en los periodos y cantidades adecuadas para cada cultivo y minimizando los vertidos incontrolados al medio.

En la figura 3.1 se puede observar el tanque de desgasificación instalado a la salida del biodigestor.

Figura 3.1. Tanque de desgasificación instalado a la salida del biodigestor

3.2. FILTRO DE ARENA

La filtración como tecnología para los procesos de tratamientos de efluentes de agua, se emplea para conseguir una mayor eliminación de la turbidez del agua, de sólidos en suspensión, como partículas y microorganismos objetables, de un tamaño mayor al tamaño de los granos del filtro empleado, a través de procesos biológicos físicos y químicos, sin la necesidad del uso de productos químicos adicionales ni energía para su funcionamiento (*Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox 2020)*. Así pues, la eficiencia del filtro será mayor cuando tenga mayor capacidad de retención de partículas. Siendo así una alternativa de purificación del efluente del digestor, sin generar una fuente adicional de contaminación para el medio ambiente (Méndez et al., 2002).

A la salida del biodigestor, se instala el filtro de arena donde elimina sólidos en suspensión y patógenos, haciendo pasar por gravedad y a baja velocidad (7-14 m3/m2·día), el agua a través del medio filtrante. Este proceso retiene los materiales sólidos que van quedando adheridos a las paredes de los granos de arena (Otero, 2006). A demás, en la capa superior del filtro de arena se forma una capa biológica de microorganismos, principalmente algas, plancton, diatomeas, protozoarios, entre otros, donde se estabilizan en los poros de los granos de arena, ayudando a digerir la materia orgánica contenida en el agua, así como la degradación de compuestos nitrogenados y la retención de partículas inertes (Amaral *et al.*, 2013). Una vez el digestado ha pasado por el filtro puede ser empleado para la aplicación al suelo agrícola.

Tras un período largo de tiempo, es necesaria la limpieza del filtro, dado que el proceso de filtración obstruye los poros del grano de arena, haciendo disminuir su eficiencia y aumentando la pérdida de carga del filtro (Otero, 2006). Por ello, el lavado o regeneración del filtro es una operación de mantenimiento que consiste en lavar el filtro con una combinación de aire y agua a contracorriente, para eliminar la materia sólida acumulada en el lecho filtrante.

El filtro de arena es una tecnología de bajo coste que puede ser construida a base de un recipiente o barril de plástico de forma cilíndrica aproximadamente de 1 m de altura, con un agujero pequeño de aproximadamente 3 cm en la parte inferior del recipiente, para que salga el efluente filtrado.

También requiere de arena gruesa, grava y piedras pequeñas que se posicionan en capas, una encima de la otra. De esta manera, el tamaño del medio filtrante afecta a la eficiencia de la tecnología, por lo que la arena gruesa con un coeficiente de uniformidad de entre 1,2 y 1,8, y un diámetro efectivo de D10% = 1 mm, suele ser el medio filtrante más utilizado ya que proporciona una mayor calidad del efluente, permite unos tiempos de retención de funcionamiento más largos y el mantenimiento del lecho es menos costoso (Otero, 2006). Así mismo, para compensar

la permeabilidad del lecho filtrante, es necesario utilizar diferentes tamaños de arena, grava y pierda.

En la figura 3.2 se puede observar el filtro de arena instalado a la salida del biodigestor. Una vez el digestado ha sido tratado con la tecnología de postratamiento, este puedo ser aplicado al cultivo.

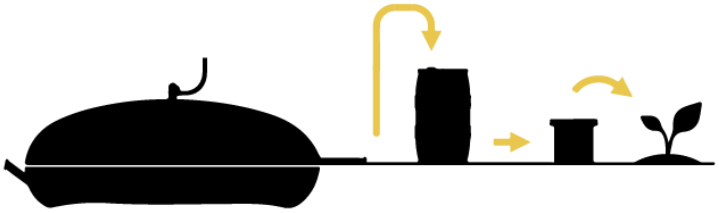

Figura 3.2. Filtro de arena instalado a la salida del biodigestor

3.3. VERMICOMPOSTAJE

El vermicompostaje es una tecnología que utiliza organismos vivos para gestionar y convertir residuos orgánicos en fertilizantes orgánicos útiles, mediante la actividad microbiana. Este proceso da lugar a mejoras de las propiedades del suelo agrícola, así como la mejora de su estructura, una alta actividad microbiana, una alta concentración de nutrientes y una alta retención de la humedad (Wu *et al.*, 2014).

El proceso de biodegradación de biosólidos y residuos orgánicos del vermicompostaje, se lleva a cabo mediante las interacciones simbióticas entre microorganismos y lombrices de tierra en un ambiente aeróbico, donde estas últimas ingieren los desechos orgánicos, fragmentando el sustrato y, mediante la digestión de los residuos orgánicos, los microorganismos presentes en el interior del estómago de las lombrices degradan bioquímicamente la materia orgánica (Fornes *et al.*, 2012).

Este proceso da como resultado la liberación del vermicast, el producto principal del vermicompostaje que tiene un alto valor fertilizante con alto contenido de humus adecuado para la aplicación en agricultura. Así mismo, una porción de los desechos orgánicos se convierte en la producción de nuevos organismos vivos y en emisiones de dióxido de carbono (Wu *et al.*, 2014).

El vermicompostaje es una tecnología que requiere de tres cajas de madera que mantenga la temperatura adecuada y una ventilación óptima para que las lombrices se encuentren en un entorno adecuado. En la caja de madera superior e intermedia, se crea un lecho de compost para que las lombrices inicien su proceso y degraden el sustrato. En la caja de madera inferior, se recogen los lixiviados que caen de las bandejas superiores. Estos lixiviados son resultado del proceso de descomposición que realizan las lombrices y puede ser utilizado como fertilizante líquido rico en nutrientes para el cultivo.

Cabe destacar que el porcentaje de humedad y el calor tanto de los organismos vivos como la descomposición del digestado líquido, deterioran rápidamente el material de construcción, llegando a una vida útil de aproximadamente 5 años (Vermican, 2019).

También, es importante una elección adecuada de las lombrices de tierra para un proceso de biodegradación optimizado, ya que modifican directamente las propiedades físicas del material de degradación e indirectamente modifica sus propiedades químicas. Las lombrices de tierra epigenicas, como son *Eudrilus eugeniae, Eisenia foetida* y *Perionyx excavatus* tienden a tener altas tasas de reproducción, alto consumo de materia orgánica y alta tolerancia los factores ambientales externos, dando así una alta eficiencia del proceso (Wu *et al.*, 2014). Es por ello que el vermicompostaje debe de realizarse en un rango adecuado de temperaturas, entre 15-20 ºC, con pH neutro y con una alta humedad, entre 70-90%, para poder mantener una alta tasa de lombrices activos y el buen funcionamiento del vermicompostador (Fornes *et al.*, 2012; Vermican, 2019).

Así mismo, el mantenimiento del vermicompostador es fácil y necesita aportes de restos de forma diaria o cada varios días.

En la figura 3.3 se puede observar el vermicompostador instalado a la salida del biodigestor. Una vez el digestado ha sido tratado con la tecnología de postratamiento, este puedo ser aplicado al cultivo.

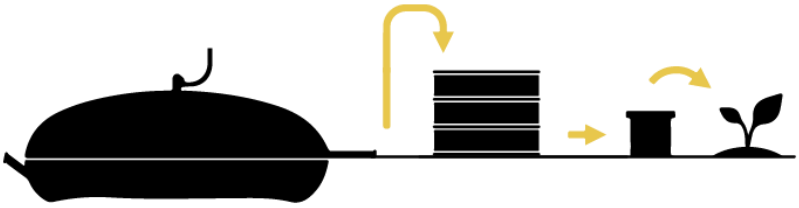

Figura 3.3. Vermicompostador instalado a la salida del biodigestor

3.4. RECIRCULACIÓN

Una alternativa para valorizar el efluente líquido procedente del biodigestor, es recircularlo al mismo biodigestor de procedencia.

La recirculación del digestato líquido puede ayudar a la dilución de la materia orgánica que entra en el digestor, disminuyendo así la necesidad de consumo de agua. Por otra parte, la comunidad microbiana presente en el efluente líquido se retorna al efluente entrante al digestor, permitiendo un tiempo de permanencia mayor. Así mismo, la comunidad microbiana es funcional y capaz de hidrolizar los compuestos orgánicos y producir hidrógeno, así como ayudar a la producción de metano y mantener el pH óptimo para el buen funcionamiento el biodigestor.

La recirculación es una tecnología de bajo coste que requiere de una tubería de polietileno conectada a la salida del biodigestor para poder recoger el efluente líquido y así poder transportarlo a la entrada del biodigestor. En ocasiones en necesaria la instalación de una bomba para ayudar al digestado líquido a circular a través de la tubería. Su reinserción en el biodigestor se realiza diariamente junto a la cantidad de agua restante y la proporción de estiércol requerido para el biodigestor.

En la figura 3.4. Se puede observar la recirculación del digestado al biodigestor. Una vez el digestado ha sido tratado con la tecnología de postratamiento, este puedo ser aplicado al cultivo.

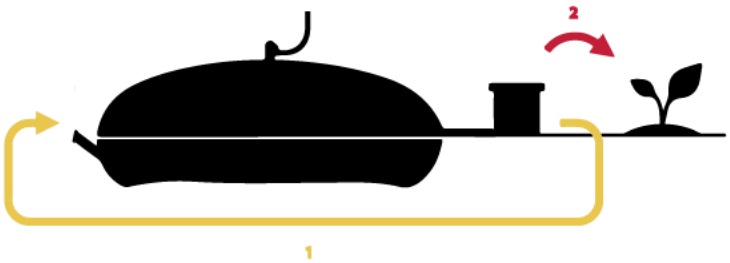

Figura 3.4. Recirculación del digestado a la salida del biodigestor

3.5. MADURACIÓN AEROBIA

Las lagunas de maduración tienen como objetivo la eliminación de bacterias patógenas sin necesidad de adicionar agentes químicos desinfectantes, la nitrificación del nitrógeno amoniacal, cierta eliminación de nutrientes, la clarificación del efluente y la consecución de un efluente bien oxigenado.

Las lagunas de maduración son construidas con tiempos de retención hidráulica entre 3 a 10 días y con poca profundidad de entre 1 a 1,5 metros, para permitir la penetración de la luz a la parte inferior y condiciones aeróbicas durante toda la profundidad (Tzatchkov, 2007).

Hay muchos factores climáticos que pueden afectar a las lagunas de maduración como las precipitaciones, al ser una laguna abierta el volumen de agua puede aumentar, la radiación solar ocasiona el aumento de la actividad bacteriana, el viento o la evaporación, y la temperatura que influencia en las reacciones físicas, químicas y bioquímicas que ocurren dentro de la laguna, ya que al aumentar la temperatura, la velocidad de degradación es mayor y por el contrario puede ser retardado por las bajas temperaturas (Tzatchkov, 2007).

En la figura 3.5 se puede observar la maduración aerobia instalada a la salida del biodigestor. Una vez el digestado ha sido tratado con la tecnología de postratamiento, este puedo ser aplicado al cultivo.

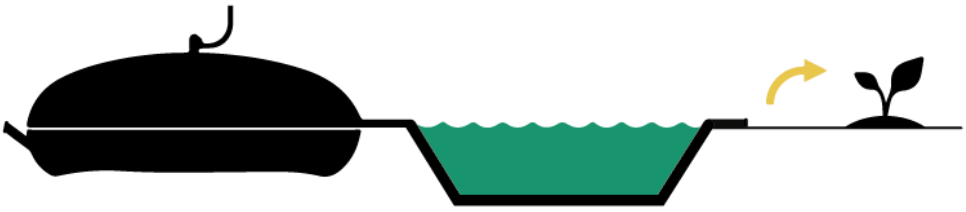

Figura 3.5. Maduración aerobia instalada a la salida del biodigestor

4. METODOLOGÍA UTILIZADA

El análisis multicriterio es un método que permite la toma de decisiones a partir de varios criterios, facilitando así la compresión y la resolución de problemas de toma de decisión .

Es una herramienta multidisciplinar de toma de decisiones desarrollada para resolver problemas complejos de multicriterio que incluyen aspectos cualitativos y/o cuantitativos del problema en el proceso de toma de decisión. Es una herramienta desarrollada en el campo de la teoría de la decisión para ayudar a la resolución de problemas (Garfì et al., 2009).

Es una metodología sencilla que generalmente consiste en: definir y ponderar los criterios seleccionados, y evaluar y comprar alternativas, para poder escoger la mejor alternativa en función de los criterios (Ferrer-martí *et al.*, 2018).

Pretende ser una herramienta que pueda ser utilizada en un contexto rural de países en desarrollo y con bajos recursos, independientemente de la situación geopolítica actual de la zona. Por ello, la aplicación de un análisis multicriterio en alternativas de postratamiento del efluente líquido de biodigestores de bajo coste en zonas rurales de países del sur es un método adecuado en este tipo de contexto ya que permite tener en cuenta e involucra aspectos técnicos, ambientales, socioculturales y económicos, juntamente con la opinión de expertos en el sector involucrados en el proyecto.

Cada uno de estos aspectos, engloba varios criterios n que se determinan de manera cualitativa o cuantitativa y se evalúan m alternativas. Por ello, su expresión es en forma de matriz (Bustillo et al., 2008; Wang *et al.*, 2020):

$$
\begin{array}{ll}
 & \text{Criteris } C_1 \;\; C_2 \;\; \cdots \;\; C_n \\
 & (\text{pesos } w_1 \;\; w_2 \;\; \cdots \;\; w_n) \\
\text{Alternatives} & \text{----- -- ---- ---- ---- --- --} \\
X = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}_{mxn}
\end{array}
$$

(Eq. 4.1)

Donde x_{ij} es el valor del criterio j de la alternativa i; w_j es el peso del criterio j y n es el número de criterios y m el número de alternativas.

*Por el proceso de selección de alternativas se ha seguido la propuesta descrita por WANG, donde se sigue una división de 4 puntos: definición de criterios, ponderación de criterios, evaluación de las alternativas y agregación de resultados.

4.1. DEFINICIÓN DE ASPECTOS, CRITERIOS Y SUBCRITERIOS

La identificación de los criterios debe ser precisa ya que es fundamental para definir posteriormente, cuáles serán sus variables y sus subcriterios.

En este proyecto se han establecido 4 grupos principales de aspectos que engloban a los diferentes criterios y subcriterios, según si son de aspecto técnico, ambiental, social y

económico. Cada uno de estos aspectos debe involucrar y reflejar las preocupaciones más relevantes para la resoluciones del problema (Ferrer-martí *et al.*, 2018). Por ello, cada aspecto requiere tener un número de criterios suficientes para incluir todos los actores involucrados, sin excederse ya que podría entorpecer el proceso de consenso.

Los criterios son los estándares utilizados para la posterior clasificación de las alternativas. Su selección precisa reflejar las preocupaciones y preferencias de los tomadores de decisiones y las partes interesadas. Así mismo, los criterios seleccionados deben ser claramente definidos y diferenciados de los demás para evitar redundancias y confusiones entre ellos, además de ser mesurables para poder ser evaluados cuantitativa o cualitativamente (Ferrer-martí *et al.*, 2018).

Los criterios que se han propuesto y seleccionado para este análisis multicriterio son 12, repartidos en los 4 aspectos seleccionados. Estos se encuentran expuestos y desarrollados en el capítulo 5 de este proyecto. Cada uno de ellos engloba un conjunto de subcriterios que deben contar con una alta presión en cuanto a definición, evaluación y medida, para facilitar el desarrollo del análisis multicriterio.

4.2. PONDERACIÓN DE CRITERIOS

La ponderación de criterios consiste en la asignación de un valor numérico a cada criterio en función del peso/importancia que se considere que ha de tener su valoración en el resultado final. Para la asignación de pesos a los criterios existen diversos métodos en los cuales varía el grado de actividad y la variabilidad de los valores de los pesos asignados en función de la influencia del encargado de tomar la decisión (Bustillo et al., 2008).

La ponderación requiere establecer un equipo de expertos para la evaluación del proyecto y así poder construir un modelo que sirva para la evaluación de las alternativas. Las personas elegidas deben ser profesionales que tengan conocimientos y experiencia sólidos en la materia.

Para proyectos que se desarrollan en el ámbito de energía se dividen 2 métodos principales.

- Método de asignación directa: consiste en la ponderación de criterios de forma individual e independiente del resto de criterios seleccionados. Es un método donde el grado de subjetividad es bastante elevado ya que depende directamente de la opinión de expertos y por este motivo es un método que se una frecuentemente dada la facilidad de su aplicación
- Método de asignación por pares: consiste en la comparativa de los criterios seleccionados de 2 en 2 y en asignar valores según la importancia relativa que se considere de un criterio sobre el otro. Este proceso aplicado a todos los pares de criterios posibles permite extraer la relativización de todos los criterios entre ellos y en consecuencia una ponderación en función de su importancia.

En el capítulo_ de este proyecto se expone la metodología escogida para la asignación de pesos y las ponderaciones resultantes de esta.

4.3. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y AGREGACIÓN DE RESULTADOS

La herramienta con la que se evalúan las alternativas y la agregación de resultados es la programación compromiso, que ayuda a evaluar cada alternativa en función de los criterios escogidos y en la convergencia de diferentes métodos y variantes de un mismo método. Es una herramienta sencilla y adecuada para usar en contextos de zonas en desarrollo (Domenech, 2013; Ferrer-martí *et al.*, 2018).

La estructura del modelo matemático de la herramienta de programación compromiso es la siguiente (Bustillo et al., 2008; Cabello, 2017). La alternativa ideal se representa con la siguiente función:

$$F^* = (F_1^*, \cdots F_i^*, \cdots F_n^*)$$

(Eq. 4.2)

Sujeta a:

$$x \in F$$

(Eq. 4.3)

Donde:

F^* : es el valor de la función para la solución óptima

F_i^* : es el valor óptimo para el criterio i

El valor F_i^* varia en función de cada criterio y si el valor óptimo es el máximo posible (+) o el mínimo posible (-).

Para poder escoger que alternativa es más adecuada según el subcriterio que se esté evaluando, se escoge aquella alternativa que tenga una distancia menor a la solución ideal. Es decir, la distancia entre el valor real de una alternativa para el criterio i, y el valor ideal de aquella alternativa. Su representación es la siguiente:

$$d_j = |F_i^* - F_i(x)|$$

(Eq. 4.4)

Por otra parte, cada criterio es evaluado con unidades de medida distintas, por lo que es necesario normalizar los valores de las distancias para poder respetar los pesos asignados a cada criterio. Así pues, para normalizar los valores de la distancia, se divide entre el valor ideal F_i^* y el valor antideal F_{*i}. De esta manera tenemos que:

$$d_j = \frac{F_i^* - F_i(x)}{F_i^* - F_{*i}}$$

(Eq. 4.5)

Se debe considerar los pesos que se han asignado a cada criterio, por lo que:

$$[MIN]L_p = \left[\sum_{\mathrm{i}=1}^{n} W_i^p \left[\frac{F_i^* - F_i(x)}{F_i^* - F_{*i}}\right]^p\right]^{1/p}$$

(Eq. 4.6)

Sujeta a:

$$x \in F$$

(Eq. 4.7)

Donde:

p: es la métrica utilizada

L_p: es la distancia total de cada alternativa con la solución ideal

n: es el numero del criterio

i: es el criterio que se evalúa

W_i: es el peso asignado al criterio i

F_i^*: es el valor ideal que corresponde al criterio i

$F_i(x)$: es el valor real de la alternativa que se está evaluando para el criterio i

F_{*i}: es el valor antideal que corresponde al criterio i

En el apartado 5, los criterios se han clasificado en la columna + / - según si el valor óptimo del mismo es el máximo posible (+) o el mínimo (-).

El parámetro p representa la métrica utilizada para valorar la distancia de la alternativa evaluada. Según el valor de p el valor resultante de la distancia varia y como consecuencia la alternativa resultante como a óptima también puede variar.

Si el valor del parámetro p aumenta, se da mayor importancia a la mejor diferencia entre el valor de la alternativa por el criterio y su valor ideal. Los valores de p más utilizados son 1, 2 y ∞.

- Para valores de $p = 1$, la función objetivo es:

$$[MIN]L_1 = \sum_{\mathrm{i}=1}^{n} W_i \left[\frac{F_i^* - F_i(x)}{F_i^* - F_{*i}}\right]$$

(Eq. 4.8)

- Para valores de $p = 2$, la función objetivo es:

$$[MIN]L_2 = \sqrt[2]{\sum_{\mathrm{i}=1}^{n} W_i^2 \left[\frac{F_i^* - F_i(x)}{F_i^* - F_{*i}}\right]^2}$$

(Eq. 4.9)

- Para valores de $p = \infty$, la función objetivo es:

$$[MIN]L_\infty = \mathrm{D}$$

(Eq. 4.10)

Cuando D sea:

$$D \geq W_1 \left[\frac{F_1^* - F_1(x)}{F_1^* - F_{*1}} \right]$$

(Eq. 4.11)

$$D \geq W_i \left[\frac{F_i^* - F_i(x)}{F_i^* - F_{*i}} \right]$$

(Eq. 4.12)

$$D \geq W_{\mathrm{n}} \left[\frac{F_{\mathrm{n}}^* - F_n(x)}{F_n^* - F_{*n}} \right]$$

(Eq. 4.13)

Para este proyecto, se ha tomado de referencia la combinación de la distancia L_1 y $L\infty$ $(\alpha \cdot L^1 + [1 - \alpha] \cdot L\infty)$, en función de un parámetro α, considerando $\alpha = 0{,}5$ (Domenech Léga, 2013).

5. SELECCIÓN DE CRITERIOS

Para la selección de los criterios se ha realizado una revisión bibliográfica de experiencias previas de utilización de tecnologías de post tratamiento para el digestado de biodigestores de bajo coste en un contexto rural de LAC, así como experiencias previas en la utilización de biodigestores de bajo coste en diferentes zonas rurales de LAC. A parte, se ha tenido en cuenta la opinión de un equipo de expertos participes del proyecto, para lograr una adecuada selección de criterios considerando todos los aspectos más relevantes que influyen en el proyecto.

La identificación de los criterios se ha precisado englobándolos en los aspectos técnico, ambiental, social y económico, más relevantes y de mayor influencia para este caso de estudio. Así mismo, para facilitar la asignación de pesos a los criterios, se han subdividido en subcriterios, evaluados de manera cualitativa o cuantitativa, según las condiciones específicas de cada uno de ellos.

Durante el proceso de investigación, se ha generado un número de criterios que ha ido variando y se ha ido modificando a lo largo del proyecto, en función de la opinión de los actores participantes que, según su experiencia, han considerado unos criterios más relevantes que otros. Así mismo, la supresión de algunos criterios ha facilitado la aplicación óptima de la herramienta de análisis multicriterio y ha logrado obtener datos relevantes para dar solución al problema planteado.

A continuación, se detallan los criterios elegidos para la selección de la tecnología de postratamiento del digestado más sostenible según el contexto considerado. Los criterios quieren ser universales, o sea aplicables a cualquier contexto rural de LAC. Se ha clasificado cada criterio en la columna + / - según si el valor óptimo del mismo es el máximo posible (+) o el mínimo (-).

Como resultado de la búsqueda bibliográfica y de la participación de expertos en el área, ha resultado una lista de 30 subcriterios agrupados en 12 criterios descritos en 4 aspectos diferentes (tabla 5.1):

Aspecto	Criterio	Subcriterio		Definición	+/-
Técnico	Características digestato (Cantidad y calidad)	CT1	Contenidos químicos-metales	Priorizar la solución/tecnología que proporcione un digestato con menor contenido de metales (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Mb, Ni, Pb, Se y Zn)	-
		CT2	Contenidos microbiológicos	Priorizar la solución/tecnología que proporcione un digestado con menor o nulo contenido de Coliformes Fecales, Huevos de Helmintos Viables, Salmonella sp., Virus Entéricos y Fangos somáticos	-
		CT3	Contenido de materia seca	Priorizar la solución/tecnología que proporcione un digestado con un porcentaje mayor de materia seca	+
		CT4	Contenido de nutrientes	Priorizar la solución/tecnología que proporcione un digestado con un contenido de nutrientes (NPK) apropiado para su uso en agricultura	+
		CT5	pH	Priorizar la solución/tecnología que proporcione un digestado con un pH alrededor de 7, apropiado para su uso en agricultura	
		CT6	Conductividad eléctrica	Priorizar la solución/tecnología que proporcione un digestado con una conductividad eléctrica entre 5 y 8 µS/cm, apropiado para su uso en agricultura	
		CT7	Producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado)	Priorizar la solución/tecnología que proporcione una mayor producción de biogás y un digestado con un menor contenido de metano soluble	+
	Gestión	CT8	Necesidad de personal cualificado	Priorizar la solución/tecnología que no requiera personal cualificado para su construcción y manejo	-
		CT9	Facilidad de construcción e implementación	Priorizar la solución/tecnología que tenga menor dificultad para su construcción e implementación (simple construcción, disponibilidad de materiales locales, etc).	+

		CT10	Facilidad de mantenimiento	Priorizar la solución/tecnología que requiera menos horas al día para su gestión y mantenimiento (mantenimiento, manejo/aplicación del digestato)	+
	Disponibilidad de superficie	CT11	Necesidad de superficie	Priorizar la solución/tecnología que se adapte mejor al emplazamiento disponible y a la disponibilidad de superficie en la finca	-
	Vida útil	CT12	Vida útil	Priorizar la solución/tecnología que tenga mayor garantía de durabilidad y una mayor vida útil	+
Ambiental	Contaminación	CA1	Generación de residuos	Priorizar la solución/tecnología que genere menor cantidad de residuos	-
		CA2	Emisiones al aire (partículas)	Priorizar la solución/tecnología que genere menores emisiones de gases tales como el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), óxidos de azufre SOx, hidrógeno (H_2), amoníaco (NH_3), monóxido de carbono (CO) y oxigeno (O_2), así como las partículas en suspensión PM10 y PM2,5	-
		CA3	Emisiones al suelo	Priorizar la solución/tecnología que tenga menor impacto sobre la calidad del suelo	-
		CA4	Emisiones al agua	Priorizar la solución/tecnología que tenga menor impacto sobre la calidad de las aguas superficiales y subterráneas	-
		CA5	Emisiones de olores	Priorizar la solución/tecnología que genere menor cantidad de gases contaminantes odoríferos tales como el ácido sulfhídrico (H_2S) y el amoníaco (NH_3)	-
		CA6	Emisiones de gases de efecto invernadero	Priorizar la solución/tecnología que tenga menor contribución al cambio climático (menores emisiones directas de gases de efecto invernadero, metano, CO_2, dióxido de nitrógeno)	-

		CA7	Generación de aerosoles (patógenos)	Priorizar la solución/tecnología que genere menor cantidad de aerosoles que pueden contener patógenos	-
	Consumo de recursos	CA8	Sostenibilidad de los materiales	Priorizar la solución/tecnología que utilice materiales sostenibles (renovables y locales)	+
		CA9	Consumo de agua	Priorizar la solución/tecnología que requiera un menor consumo de agua para su funcionamiento y construcción y/o que pueda facilitar el ahorro de agua para el funcionamiento del digestor sobre todo en época de sequía	-
		CA10	Consumo de energía	Priorizar la solución/tecnología que requiera un menor consumo de energía para su funcionamiento y construcción	-
Económico	Coste	CE1	Inversión inicial (Capacidad de pago)	Priorizar la solución/tecnología que requiera de una inversión inicial menor o que se adapte a la capacidad de pago	-
		CE2	Coste de mantenimiento	Priorizar la solución/tecnología que requiera de un coste de mantenimiento menor	-
	Beneficios	CE3	Generación de ingresos	Priorizar la solución/tecnología que pueda dar un beneficio económico mayor (por ejemplo: comercialización del digestado o estruvita, aumento producción agrícola)	+
		CE4	Capacidad de ahorro	Priorizar la solución/tecnología que evite un gasto (por ejemplo que proporciona fertilizante o mayor cantidad de combustible)	+
Social	Condiciones de vida	CS1	Mejoramiento de las condiciones de vida	Priorizar la solución/tecnología que mejore las condiciones de vida de la familia/comunidad	+
	Aceptación de la tecnología	CS2	Grado de aceptación	Priorizar la solución/tecnología que tenga un mayor grado de aceptación en función del contexto cultural (por ejemplo una tecnología que ya esté consolidada)	+

	Género	CS3	Equidad de género	Priorizar la solución/tecnología que no tenga sesgos de géneros y que respete/mejore las condiciones de las mujeres	+
	Salud	CS4	Beneficios en la salud	Priorizar la solución/tecnología que tenga beneficios en la salud y menor afectación a la salud humana por ejemplo debido al manejo del digestado	+

Tabla 5.1. Definición criterios y subcriterios para el Análisis Multicriterio

6. PONDERACIÓN DE CRITERIOS

Para la ponderación y asignación de pesos de los subcriterios descritos en el apartado anterior, ha sido necesario encuestar a expertos y usuarios del ámbito de aplicación de biodigestores y postratamiento del digestado.

En el anexo I se encuentra la encuesta realizada a los distintos participantes, donde recoge el perfil del participante, según la organización a la que pertenece, el perfil del encuestado, el tipo de tecnología de biodigestores y de postratamiento de digestado con la que se ha trabajado, así como las regiones de aplicación donde se han llevado a cabo sus actividades, tanto el país y/o ciudad, el área y el clima de este. Mediante su experiencia el participante ha ponderado cada subcriterio según ha considerado su importancia, siendo 1 poco importante y 5 muy importante. Esta encuesta se puede encontrar en el anexo I.

*Se ha escogido un método de asignación directa porque, incluso tener una fuerte carga subjetiva comparada con otros métodos como la comparación por pares, permite tener en cuenta la opinión de decisores a la vez que reducen la complejidad a la hora de resolver el problema.

Se ha resumido el perfil del participante de las encuestas en la tabla 6.1:

Participantes		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Perfil	Técnico				X		X		
	Sociólogo								
	Profesor/investigador	X	X	X		X		X	
	Otros								X
Tecnología biodigestor	Digestores tubulares	X	X	X	X	X		X	
	Digestores de hormigón						X		
	Otros						X		
Postratamiento digestado	Aplicación directa del digestado	X	X	X	X	X	X	X	X
	Tanque de desgasificación								
	Filtro de arena								
	Vermicompostaje								
	Conversión térmica								
	Recirculación del digestado							X	
	Recuperación de estruvita						X		
	Maduración anaerobia								
	Otros								
País/Ciudad									
Área	Montañoso	X	X						X
	Tropical			X		X		X	
	Otros				X		X		
Clima	Tropical			X	X	X		X	
	Templado				X				X
	Estepario				X				
	Templado frío				X				
	De montaña	X	X		X				
	Otros						X		

Participantes		9	10	11	12	13	14	15	16	Recuento
Perfil	Técnico				X			X	X	5
	Sociólogo									0
	Profesor/investigador	X	X			X	X			9
	Otros			X						2
Tecnología biodigestor	Digestores tubulares			X	X	X			X	10
	Digestores de hormigón		X							2
	Otros				X		X	X	X	5
Postratamiento digestado	Aplicación directa del digestado			X	X	X		X	X	13
	Tanque de desgasificación									0
	Filtro de arena									0
	Vermicompostaje		X					X		2
	Conversión térmica								X	1
	Recirculación del digestado				X				X	3
	Recuperación de estruvita		X							2
	Maduración anaerobia				X	X		X	X	4
	Otros		X				X			2
País/Ciudad										
Área	Montañoso			X	X	X		X	X	8
	Tropical				X					4
	Otros						X			3
Clima	Tropical			X	X					6
	Templado		X	X	X			X		6
	Estepario									1
	Templado frío				X	X			X	4
	De montaña									3
	Otros						X	X		3

Tabla 6.1. Perfil de los participantes de la encuesta para el Análisis Multicriterio

Según los datos obtenidos de la encuesta, Anexo I, en las siguientes gráficas, se han resumido el recuento de las ponderaciones realizadas por los 16 expertos encuestados, para los 4 aspectos generales. Dichas ponderaciones se han valorado según su importancia, siendo 1 poco importante y 5 muy importante:

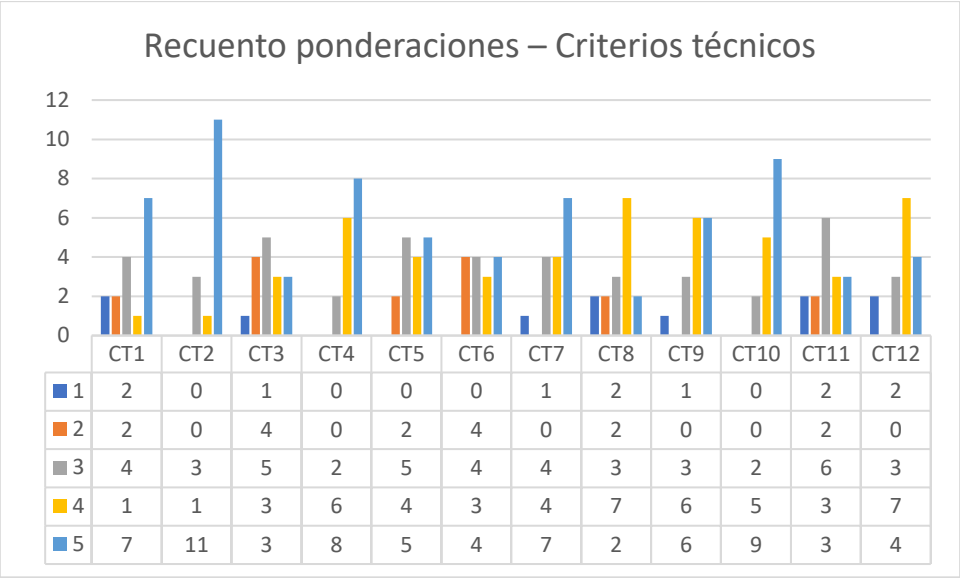

Figura 6.1. Recuento de las ponderaciones de los criterios técnicos

Criterio	Subcriterio		Promedio
Características digestato (Cantidad y calidad)	CT1	Contenidos químicos-metales	3,56
	CT2	Contenidos microbiológicos	4,53
	CT3	Contenido de materia seca	3,19
	CT4	Contenido de nutrientes	4,38
	CT5	pH	3,75
	CT6	Conductividad eléctrica	3,47
	CT7	Producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado)	4,00
Gestión	CT8	Necesidad de personal cualificado	3,31
	CT9	Facilidad de construcción e implementación	4,00
	CT10	Facilidad de mantenimiento	4,44
Disponibilidad de superficie	CT12	Necesidad de superficie	3,19
Vida útil	CT13	Vida útil	3,69

Tabla 6.2. Promedio de ponderaciones de los subcriterios del aspecto Técnico

En la figura 6.1 y la tabla 6.2, se observa que los participantes de la encuesta creen que los criterios técnicos tienen una fuerte influencia a la hora de escoger la mejor solución para el postratamiento del digestado. Entre ellos destacan los subcriterios: (CT1) contenidos microbiológicos (4,53), (CT4) contenido de nutrientes (4,38), (CT7) producción de biogás/potencial de biometanización (en el digestado) (4,00), (CT9) facilidad de construcción e implementación (4,00) y (CT10) facilidad de mantenimiento (4,44). No obstante, los criterios con un promedio de puntuaciones por debajo de 4 también han obtenido valores de importancia elevados.

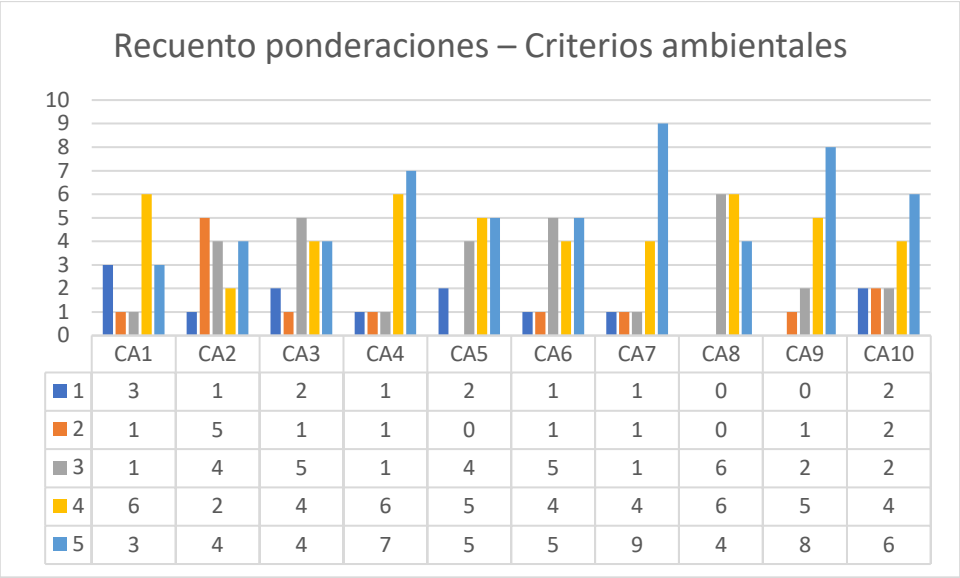

Figura 6.2. Recuento de las ponderaciones de los criterios ambientales

Criterio	Subcriterio		Promedio
Contaminación	CA1	Generación de residuos	3,36
	CA2	Emisiones al aire (partículas)	3,19
	CA3	Emisiones al suelo	3,44
	CA4	Emisiones al agua	4,06
	CA5	Emisiones de olores	3,69
	CA6	Emisiones de gases de efecto invernadero	3,69
	CA7	Generación de aerosoles (patógenos)	4,19
Consumo de recursos	CA8	Sostenibilidad de los materiales	3,88
	CA9	Consumo de agua	4,25
	CA10	Consumo de energía	3,63

Tabla 6.3. Promedio de ponderaciones de los subcriterios del aspecto Ambiental

En la figura 6.2 y la tabla 6.3, se observa que los participantes de la encuesta creen que los criterios ambientales más importantes son: (CA4) emisiones al agua (4,06), (CA7) generación de aerosoles (patógenos) (4,19) y (CA9) consumo de agua (4,25).

Sin embargo, todos los criterios ambientales están fuertemente valorados con un promedio de importancia mayor a 3,19. Algunos de mayor importancia son: (CA5) emisión de olores (3,69), (CA6) emisiones de fases de efecto invernadero (3,69) y (CA8) sostenibilidad de materiales (3,88).

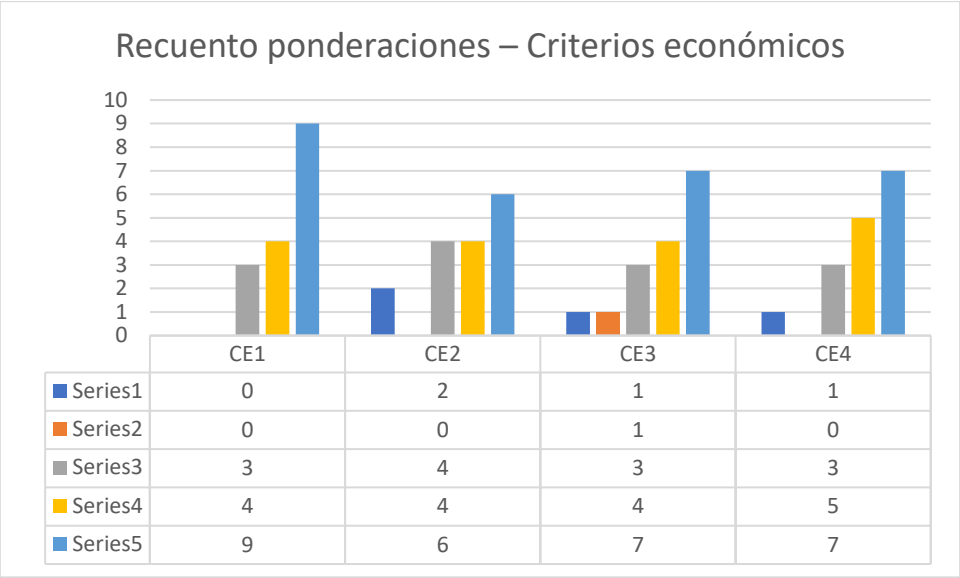

Figura 6.3. Recuento de las ponderaciones de los criterios económicos

Criterio	Subcriterio		Promedio
Coste	CE1	Inversión inicial (capacidad de pago)	4,38
	CE2	Coste de mantenimiento	3,75
Beneficios	CE3	Generación de ingresos	3,94
	CE4	Capacidad de ahorro	4,06

Tabla 6.4. Promedio de ponderaciones de los subcriterios del aspecto Económico

En la figura 6.3 y la tabla 6.4, se observar cómo los criterios económicos tienen una influencia alta en el momento de escoger la mejor alternativa para el postratamiento del digestado. Todos los subcriterios tienen un promedio superior a 3,75, destacando entre ellos: (CE1) Inversión inicial (capacidad de pago) (4,38) y capacidad de ahorro (4,06).

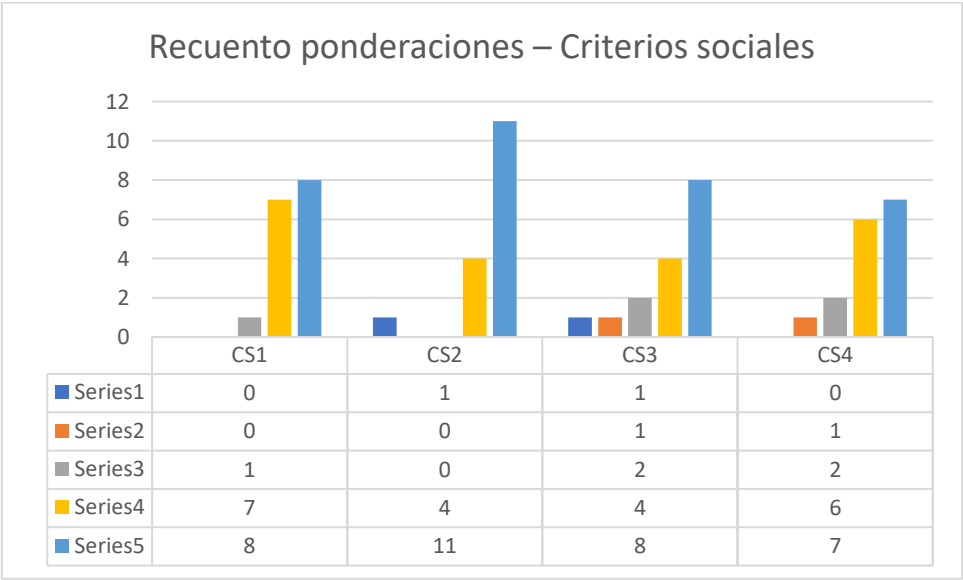

Figura 6.4. Recuento de las ponderaciones de los criterios sociales

Criterio	Subcriterio		Promedio
Condiciones de vida	CS1	Mejoramiento de las condiciones de vida	4,44
Aceptación de la tecnología	CS2	Grado de aceptación	4,50
Equidad de genero	CS3	Igualdad de género	4,06
Salud	CS4	Beneficios en la salud	4,19

Tabla 6.5. Promedio de ponderaciones de los subcriterios del aspecto Social

En la figura 6.4 y la tabla 6.5, se observar que todos los criterios sociales han sido ponderados con una elevada importancia a la hora de escoger una alternativa de postratamiento para el digestado. Todos los subcriterios sociales tienen un promedio superior a 4, lo que implica que las condiciones sociales del lugar de implementación tendrán una fuerte influencia para aplicar o no las tecnologías y cuál es la mejor alternativa posible de implementación.

6.1. RESULTADOS SEGÚN DIFERENCIACIÓN DE PERFILES

Con todo ello, los resultados de cada aspecto son muy similares entre sí. Por este motivo y para poder evaluar las diferentes alternativas propuestas, teniendo en cuenta la opinión de los expertos y usuarios encuestados, se ha realizado la segregación de los resultados de las ponderaciones finales, diferenciando según el tipo de perfil de los participantes.

Las ponderaciones extraídas responden a las siguientes divisiones:

- Según tipo de perfil profesional: técnico, sociólogo, profesor/investigador, otros
- Según si el participante conoce el contexto de trabajar con biodigestores de bajo coste o no

6.1.1. SEGÚN TIPO DE PERFIL PROFESIONAL

En la tabla 6.6 se ha realizado el promedio de las ponderaciones diferenciando según el perfil profesional de los participantes encuestados, para comprar las diferencias significativas entre las ponderaciones, juntamente con los resultados de las ponderaciones generales.

No se ha realizado el promedio de las ponderaciones del perfil profesional “Sociólogo”, ya que ningún participante encuestado pertenece a este tipo de perfil profesional. Por otra parte, los participantes que pertenecen al perfil profesional “Otros” , son estudiantes de maestría que han trabajado en un contexto de biodigestores.

Criterio	Subcriterio	Promedio			
		General	Técnico	Profesor/ investigador	Otros
Características digestado (cantidad y calidad)	CT1	3,56	2,60	4,44	2,00
	CT2	4,53	3,80	4,88	5,00
	CT3	3,19	3,40	3,11	3,00
	CT4	4,38	4,00	4,44	5,00
	CT5	3,75	3,40	3,67	5,00
	CT6	3,47	3,00	3,00	5,00

	CT7	4,00	4,20	3,67	5,00
Gestión	CT8	3,31	3,40	3,33	3,00
	CT9	4,00	3,80	3,89	5,00
	CT10	4,44	4,20	4,44	5,00
Disponibilidad de mantenimiento	CT11	3,19	3,20	3,22	3,00
Vida útil	CT12	3,69	4,20	3,56	3,00
Contaminación	CA1	3,36	3,20	3,57	3,00
	CA2	3,19	3,00	2,89	5,00
	CA3	3,44	3,20	3,56	3,50
	CA4	4,06	3,80	4,00	5,00
	CA5	3,69	3,40	4,00	3,00
	CA6	3,69	3,40	3,56	5,00
	CA7	4,19	3,40	4,44	5,00
Consumo de recursos	CA8	3,88	3,60	3,78	5,00
	CA9	4,25	3,60	4,44	5,00
	CA10	3,63	3,80	3,67	3,00
Coste	CE1	4,38	4,60	4,11	5,00
	CE2	3,75	4,00	4,22	1,00
Beneficios	CE3	3,94	4,00	4,11	3,00
	CE4	4,06	3,20	4,33	5,00
Condiciones de vida	CS1	4,44	4,40	4,33	5,00
Aceptación de la tecnología	CS2	4,50	4,80	4,67	3,00
Equidad de genero	CS3	4,06	4,00	4,33	3,00
Salud	CS4	4,19	3,80	4,22	5,00

Tabla 6.6. Promedio de ponderaciones de los criterios y subcriterios según el perfil profesional

En la tabla 6.6, se observan que las ponderaciones más altas y por lo tanto, con más creencia de importancia de los criterios, son las ponderaciones realizadas por el perfil profesional “Otros”, seguido del perfil profesional “Profesor/investigador” y finalmente el perfil profesional “Técnico”.

Según el perfil profesional “Otros”, gran número de subcriterios tienen una importancia de 5 (muy importante), exceptuando: (CT1) Contenido de químicos-metales y (CE2) Coste de mantenimiento, que coinciden con una ponderación igual o inferior a 2 (poco importante).

Respecto al perfil profesional “Profesor/Investigador”, los criterios que registran mayor ponderación según su importancia están registrados en los criterios técnicos. Entre los más relevantes se encuentran: (CT1) Contenidos químicos-metales, (CT2) Contenidos microbiológicos, (CT4) Contenido de nutrientes y (CT10) Facilidad de mantenimiento. También, en los criterios sociales y económicos, registrando todas las ponderaciones con valores superiores a 4 (bastante importante), destacando: (CE4) Capacidad de ahorro, (CS1) Mejoramiento de las condiciones de vida, (CS2) Grado de aceptación y (CS3) Igualdad de género.

Así mismo, en el perfil profesional “Técnico”, las ponderaciones más altas se registran en los criterios económicos y sociales con puntuaciones de alta importancia. Entre ellos destacan los subcriterios: (CE1) Inversión inicial (capacidad de pago) y (CS2) Grado de aceptación.

Si bien todas las ponderaciones de los distintos perfiles profesionales varían entre sí registrando valores entre 2 (poco importante) y 5 (muy importante), en la columna General se observa que todos los subcriterios tienen unas ponderaciones relativamente altas i significativas.

6.1.2. SEGÚN CONTEXTO DE TRABAJO CON BIODIGESTORES DE BAJO COSTE

En la tabla 6.7 se ha realizado una diferenciación de las ponderaciones según si el participante conoce el contexto de trabajo con biodigestores de bajo coste o no, juntamente con los resultados de las ponderaciones generales, para comprobar si existen diferencias significativas entre las ponderaciones de los subcriterios.

Los participantes que no pertenecen al grupo de trabajo con biodigestores de bajo coste son dos expertos en digestión pero no han trabajado en países en desarrollo.

		Promedio		
Criterio	**Subcriterio**	**General**	**Contexto biodigestores de bajo coste - SI**	**Contexto de biodigestores de bajo coste - NO**
Características digestado (cantidad y calidad)	CT1	3,56	3,46	4,00
	CT2	4,53	4,54	3,00
	CT3	3,19	3,31	2,67
	CT4	4,38	4,23	5,00
	CT5	3,75	3,77	3,67
	CT6	3,47	3,15	3,67
	CT7	4,00	4,23	3,00
Gestión	CT8	3,31	3,38	3,00
	CT9	4,00	4,23	3,00
	CT10	4,44	4,46	4,33
Disponibilidad de mantenimiento	CT11	3,19	3,31	2,67
Vida útil	CT12	3,69	3,92	2,67
Contaminación	CA1	3,36	2,92	3,00
	CA2	3,19	3,31	2,67
	CA3	3,44	3,31	4,00
	CA4	4,06	4,00	4,33
	CA5	3,69	3,69	3,67
	CA6	3,69	3,77	3,33
	CA7	4,19	4,31	3,67
Consumo de recursos	CA8	3,88	3,92	3,67
	CA9	4,25	4,31	4,00
	CA10	3,63	3,62	3,67
Coste	CE1	4,38	4,46	4,00
	CE2	3,75	3,69	4,00
Beneficios	CE3	3,94	3,85	4,33
	CE4	4,06	4,00	4,33
Condiciones de vida	CS1	4,44	4,54	4,00
Aceptación de la tecnología	CS2	4,50	4,54	4,33

Equidad de genero	CS3	4,06	4,23	3,33
Salud	CS4	4,19	4,31	3,67

Tabla 6.7. Promedio de ponderaciones de los criterios y subcriterios según el contexto de trabajar con biodigestores de bajo coste

En la tabla 6.7, se observa que las ponderaciones de los criterios son similares entre los perfiles de participantes que han trabajado en un contexto de biodigestores de bajo coste y en el perfil de participantes que no han trabajado en un contexto de biodigestores de bajo coste.

Según el perfil de participantes que han trabajado en un contexto de biodigestores de bajo coste, las ponderaciones más altas se registran en los criterios técnicos, económicos y sociales. Entre ellos destacan: (CT2) contenido microbiológico, (CE1) Inversión inicial (capacidad de pago), (CS1) mejoramiento de las condiciones de vida y (CS2) Grado de aceptación.

Respeto al perfil de participantes que no han trabajado en un contexto de biodigestores de bajo coste, las ponderaciones más altas se registran principalmente en los criterios económicos y sociales: (CE2) Coste de mantenimiento, (CE3) Generación de ingresos y (CS2) Grado de aceptación. También se registra una ponderación con alta importancia en los criterios técnicos y ambientales tales como: (CT10) Facilidad de construcción e implementación y (CA4) emisiones al agua.

Pese a que todas las ponderaciones de los dos perfiles de participantes en el contexto de trabajo con biodigestores de bajo coste difieren entre ellas y se registran valores superiores a 2 (poco importante), hasta 5 (muy importante), no se observan diferencias significativas entre perfiles, por lo que el resultado no se ve altamente alterado por esta condición de perfil profesional.

7. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Para la validación de la herramienta se han utilizado dos biodigestores de bajo coste situados en Colombia. Este país tiene una gran vocación agrícola-ganadera y de explotación de recursos naturales.

Sin embargo, aproximadamente el 50% de la población vive por debajo el umbral de pobreza, por lo que la economía se basa en la autosuficiencia agrícola familiar. Por consiguiente, los principales combustibles utilizados para la cocción y el calentamiento de los hogares son combustibles tradicionales como leña y estiércol seco, y en algunos casos de pequeños agricultores el gas licuado de petróleo (GPL), como el propano. (Garfí *et al.*, 2019) . Aun así, en Colombia recientemente se han implementado biodigestores de bajo coste para cubrir las necesidades energéticas del hogar y así substituir los combustibles tradicionales que provoca grandes afectaciones para la salud de las personas y a los ecosistemas de alrededor (Garfí *et al.*, 2011).

Por otra parte, el uso de biodigestores de bajo coste puede ayudar a los pequeños agricultores a tratar los desechos ganaderos de forma sostenible, mientras se produce biofertilizante . (Garfí *et al.*, 2019). No obstante, aun que se conoce el gran potencial de uso del digestado como fertilizante orgánico, se desconoce la forma de uso más efectiva para obtener unos mayores rendimientos de los cultivos e incluso obtener ganancias económicas y/o ahorro de energía y agua.

De este modo, para que el digestado pueda ser utilizado en agricultura como fertilizante, sin ningún ulterior tratamiento, debe cumplir los requisitos establecidos por el Decreto 1287, del 10 de julio de 2014 (Colombia), por el cual se establecen los valores máximos permisibles del contenido de químicos-metales y microbiológicos de los biosólidos (Real Decreto nº 1287, 2014).

En la siguiente tabla (tabla_) se muestra, para cada compuesto químico, el valor máximo permisible en la categoría de biosólidos:

VARIABLE Químicos-metales	**CATEGORÍA BIOSÓLIDO** Valores máximos permisibles mg/kg de biosólido (base seca)	
	A	**B**
Arsénico (As)	20	40
Cadmio (Cd)	8	40
Cobre (Cu)	1000	1750
Cromo (Cr)	1000	1500
Mercurio (Hg)	10	20
Molibdeno (Mb)	18	75
Níquel (Ni)	80	420
Plomo (Pb)	300	400
Selenio (Se)	36	100
Zinc (Zn)	2000	2800

Tabla 1. Valores máximos permisibles para la categorización de los biosólidos (Real Decreto nº 1287, 2014)

En la siguiente tabla (tabla_) se muestra el valor máximo permisible en la categoría de biosólidos del contenido microbiológico:

VARIABLE Microbiológicos	**UNIDAD DE MEDIDA**	**CATEGORÍA BIOSÓLIDO** Valores máximos permisibles	
		A	**B**
Coliformes fecales	Unidades formadoras de colonias UFC/g de biosólido (base seca)	<1,00 E (+3)	< 2,00 E (+6)
Huevos de Helmintos Viables	Huevos de Helmintos viables/4 g de biosólido (base seca)	<1,0	<10,0
Salmonella sp	Unidades formadoras de colonias UFC/g de biosólido (base seca)	Ausencia	<1,00 E (+3)

Tabla 2. Valores máximos permisibles para la categorización de los biosólidos (Real Decreto nº 1287, 2014)

Según el Real Decreto 1287 estable que, los valores máximos permisibles en mg/kg de biosólido (base seca) de la Categoría A, pueden destinarse a zonas verdes tales como cementerios, separadores viales, campos de golf, áreas privadas y los mismos usos de la Categoría B. Por otra parte, los valores máximos permisibles en mg/kg de biosólido (base seca) de la Categoría B, pueden destinarse a agricultura (aplicación al suelo), plantaciones forestales y a recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados.

Así pues, se trabaja con los valores máximos permisibles en mg/kg de biosólido (base seca) de la Categoría B.

De acuerdo con la legislación vigente, si el contenido de químicos-metales o microbiológico del digestado no cumple con los valores máximos permisibles, se debe aplicar un postratamiento del digestado antes de su aplicación en agricultura.

De este modo, se han considerado las siguientes alternativas como posibles postratamientos del digestado:

- Tanque de desgasificación (A1)
- Filtro de arena (A2)
- Vermicompostaje (A3)
- Recirculación (A4)
- Maduración aerobia (A5)
- Tanque de desgasificación + Filtro de arena (A6)
- Tanque de desgasificación + Vermicompostaje (A7)
- Tanque de desgasificación + Maduración aerobia (A8)

Teniendo en cuenta las distintas alternativas, se pretende desarrollar una metodología para definir la mejor solución para el postratamiento del digestado considerando datos de 2 comunidades de Colombia y, donde se han realizado proyectos de biodigestores previamente y se conocen los resultados del digestado producido.

7.1. CASO ESTUDIO 1

El Caso de estudio 1, hay implementado un biodigestor de bajo coste que se alimenta con estiércol de vaca.

En la siguiente tabla (tabla 7.1) se observan las características de diseño del biodigestor de bajo coste:

Parámetros biodigestor	Valor
Longitud (m)	7,5
Diámetro (m)	1,3
Volumen total (m^3)	10
Volumen de operación (m^3)	7,1
HRT (días)	35
OLR (kg VS/m^3_{op}*d)	0,7
Relación estiércol:agua lluvia (V:V)	1:3
Estiércol alimentado (kg/día)	35
Agua alimentada (L/día)	105
Temperatura promedio local ambiente (ºC)	23±4
Tasa de producción de biogás (m^3biogas/m^3digestor*día)	0,13
Producción específica (m^3biogas/kg VS)	0,15
Tiempo de uso (años)	4

Tabla 7.1. Características de diseño del biodigestor de bajo coste. HRT: Tiempo de Retención Hidráulico; OLR: Tasa de Carga Orgánica

En la siguiente tabla (tabla 7.2) se observan los parámetros obtenidos del digestado:

Parámetros digestado	Valor
SV (g/kg)	1,4±0,2
ST (g/kg)	2,1±0,4
DQO (mg/L)	17000±12
AGV totales (mg/L)	600±0,0
pH	7,1±0,27
Macronutrientes (mg/kg)	NKT: 36000 P_2O_5: 13000 K_2O: 60000
Micronutrientes (mg/kg)	CaO: 60000 MgO: 20000 SO_4: 75000 Fe: 10000 Na: 30000
Químicos-metales (mg/kg)	Cu: 490 Zn: 13000
Potencial de Biometanización Residual (m^3CH_4/kg SV)	0,058±0,009
Coliformes fecales	$1,70^7$ UFC/g

Tabla 7.2. Parámetros digestado de los biodigestores de Colombia. SV: Sólidos Volátiles; ST: Sólidos Totales; DQO: Demanda Química de Oxígeno; AGV: Ácidos Grasos Volátiles; NKT: Nitrógeno Total Kjeldahl; P_2O_5: fósforo; K_2O: potasio; CaO: calcio; MgO: magnesio; SO_4: azufre; Fe: hierro; Na: sodio; Cu: cobre; Zn: zinc

7.1.1. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CASO DE ESTUDIO 1

Se ha descrito cada tecnología en función de su dimensionamiento, parámetros de diseño y materiales utilizados para su construcción.

Teniendo en cuenta que el volumen total del líquido pude expresarse:

$$V_L = QHRT$$

(Eq. 7.1)

Donde:

V_L : Volumen total del líquido

Q: carga diaria dentro del tanque

HRT: tiempo de retención hidráulica

Los parámetros de diseño de la alternativa (A1) Tanque de desgasificación, son:

Parámetro de diseño	**Tanque de desgasificación (A1)**
Longitud (m)	4,27
Diámetro (m)	1,75
Carga diaria (L/día)	140
Volumen total (m^3)	10,20
Volumen útil (m^3)	8,40
TRH (días)	60
Materiales utilizados	Polietileno para el tanque
	Piedras

Tabla 7.3. Parámetros de diseño del Tanque de desgasificación (A1)

Los parámetros de diseño de la alternativa (A2) Filtro de arena, son:

Parámetro de diseño	**Filtro de arena (A2)**
Profundidad lecho filtrante (m)	1,00
Profundidad soporte grava (m)	0,20
Radio (m)	1,14
Carga diaria (L/día)	140
Volumen total (m^3)	4,90
Volumen útil (m^3)	3,68
TRH (días)	35
Velocidad de filtración (m/h)	0,15
Materiales utilizados	Barril de plástico
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas

Tabla 7.3. Parámetros de diseño del Filtro de arena (A2)

Los parámetros de diseño de la alternativa (A3) Vermicompostaje, son:

Parámetro de diseño	Vermicompostaje (A3)
Longitud (m)	1,00
Anchura (m)	0,50
Altura (m)	1,00
Carga diaria (L/día)	140
Volumen total (m^3)	0,50
Materiales utilizados	Cajas de madera
	Lombrices
	Sustrato

Tabla 7.4. Parámetros de diseño del Vermicompostaje (A3)

Los parámetros de diseño de la alternativa (A5) Maduración aerobia, son:

Parámetro de diseño	Maduración aerobia (A5)
Longitud (m)	4,27
Diámetro (m)	1,75
Carga diaria (L/día)	140
Volumen total (m^3)	10,20
Volumen útil (m^3)	8,40
TRH (días)	60,00
Materiales utilizados	Bolsa de polietileno
	Piedras

Tabla 7.5. Parámetros de diseño del Maduración Aerobia (A5)

Para la alternativa de Recirculación (A4), al recircular manualmente con un cubo de plástico el digestado dentro del biodigestor, no se han especificado los parámetros de diseño.

Para la alternativa A6, los parámetros de diseño son iguales a las alternativas A1+A2. Así mismo, para la alternativa A7, los parámetros de diseño son iguales a las alternativas A1+A3, y finalmente, para la alternativa A8, los parámetros de diseño son iguales a las alternativas A1+A5.

7.1.2. INTRODUCCIÓN DE DATOS

Para la introducción de datos se ha especificado los valores de cada subcriterio para cada alternativa estudiada, teniendo en cuenta la clasificación de cada criterio según si el valor óptimo es el máximo posible (+) o el mínimo posible (-).

En la siguiente tabla (tabla 7.6) se describen los datos de entrada de los Criterios Técnicos:

Subcriterios		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Unidades	+/-
CT1	Contenidos químicos-metales	13000	3620,162	31604	13000	1013,239	3620,162	31604	1013,239	mg Zn/kg ST	-
CT2	Contenidos microbiológicos	$1,70^6$	$8,50^5$	$1,70^5$	$1,7^7$	$8,50^5$	$8,50^5$	$1,70^5$	$8,50^5$	UFC/g	-
CT3	Contenido de materia seca	0,21	0,031	60	0,315	30	0,031	60	30	% MS	+

CT4	Contenido de nutrientes	0,050	0,021	0,025	0,025	0,040	0,021	0,025	0,040	mg NKT/kg	+
CT5	pH	7	7	7	7	7	7	7	7	-	
CT6	Conductividad eléctrica	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	ds/m	
CT7	Producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado)	0,058	0	0	0,029	0	0,058	0,058	0,058	m^3 CH_4/kg SV	+
CT8	Necesidad de personal cualificado	2	2	3	1	2	3	4	3	Cualitativo 1 a 5	-
CT9	Facilidad de construcción e implementación	4	3	4	5	4	2	3	3	Cualitativo 1 a 5	+
CT10	Facilidad de mantenimiento	4	4	3	3	4	3	2	3	Cualitativo 1 a 5	+
CT11	Necesidad de superficie	8,25	2,28	3	0	8,25	10,53	11,25	16,5	m^2	-
CT12	Vida útil	5	9	5	10	5	7	5	5	años	+

Tabla 7.6. Datos de entrada para la aplicación de un caso real para los Criterios Técnicos

Para la obtención de los datos de entrada que no han podido ser cuantificados de manera cuantitativa, se han valorado de manera cualitativa, 1 (muy bajo), 2 (bajo), 3 (medio), 4 (alto) y 5 (muy alto).

Debido a la gran cantidad de datos, se especifica la obtención de estos para cada subcriterio:

CT1 - Contenidos químicos-metales: se ha valorado de manera cuantitativa en mg/Kg la cantidad de químicos-metales presente en el digestado después de ser tratado con las alternativas de postratamiento.

En el análisis nutricional del digestado, solo se han obtenido datos del Cobre (Cu) y Zinc (Zn). En este estudio, se ha escogido el valor del Zinc (Zn) como el micronutriente representativo para medir los químicos-metales, ya que su mayor presencia provoca mayor alteración en la composición del digestado.

El valor de Zn en el digestado es de 13000 mg Zn/kg. Este valor es superior al valor máximo permisible de la categoría B de biosólidos (2800 mg Zn/kg de biosólido), según el Decreto 1287, del 10 de julio de 2014. Por lo tanto, su aplicación como fertilizante no estaría permitida.

Al usar tecnologías de postratamiento del digestado, la cantidad de Zn disminuye (Metcalf & Eddy, 1995; Edwards, 1997; Milán *et al.*, 2002; Garg, Gupta and Satya, 2006; Iaconi *et al.*, 2017):

- Para las alternativas A1, no hay remoción de químicos-metales, por lo que el valor de Zn es de 13000 mg ZN/kg.

- Para la alternativa A2, el contenido de químicos metales puede ser eliminado en un 95%, por lo tanto, el contenido de Zn en el digestado después de ser tratado con la tecnología del filtro de arena es del 3620,162 kg Zn/kg ST (Milán *et al.*, 2002).

$$\frac{0{,}013\ \%\ P/P}{100} * 140\ kg/día = 0{,}018\ kg\ ST/día$$

$$0{,}0182\ kg\frac{ST}{día} * 0{,}05 = 0{,}00091\ kg\ Zn/día$$

$$\frac{0{,}00091\ kg\ Zn/día * 1000000}{0{,}251\ kg\ ST/día} = 3620{,}162\ mg\ Zn/kg\ ST$$

Donde 0,251 kg ST/día es el contenido de sólidos totales en el digestado, puesto que el filtro de arena tiene una eliminación de sólidos en suspensión del 95%. Aplicando un factor de corrección de 0,9.

- Para la alternativa A3, el contenido de químicos-metales puede ser eliminado en un 55%, por lo tanto, el contenido de Zn en el digestado después de ser tratado con la tecnología de vermicompostaje es de 31604,69 mg Zn/kg ST (Milán *et al.*, 2002; Garg, Gupta and Satya, 2006).

$$\frac{0{,}013\ \%\ P/P}{100} * 140\ kg/día = 0{,}018\ kg\ ST/día$$

$$0{,}45 * 0{,}018\ kg\ ST/día = 0{,}008\ kg\ Zn/día$$

Asumiendo que las cenizas se mantienen, tenemos que:

$$0{,}294\ kg\ ST/día - 0{,}196\ kg\ SV/día = 0{,}098\ kg\ cenizas/día$$

De modo que el % TOC es de 36,430 %. Por ello, tenemos que:

$$\frac{36{,}430 * 0{,}294\ kg\ ST/día}{100} = 0{,}107\ kg\ TOC/día$$

Teniendo en cuenta que se retiene un 67,451% y se degrada el 32,549% (Milán *et al.*, 2002), tenemos que:

$$\frac{0{,}107\ kg\ TOC/día * 67{,}451}{100} = 0{,}072\ kg\ TOC/día\ en\ el\ producto$$

$$0{,}196 kg\ SV/día - 0{,}107\ kg\ TOC/día = 0{,}089\ kg\ MO/día\ (que\ no\ es\ C)$$

$$0{,}072\ kg\ TOC/día + 0{,}089\ kg\ MO/día = 0{,}161\ kg\ MO/día\ (que\ tiene\ el\ producto)$$

Por lo tanto, el 60% de los sólidos totales en el vermicompostaje es de:

$$0{,}098\ kg\ cenizas/día + 0{,}161\ kg\ MO/día = 0{,}259\ kg\ ST/día$$

Finalmente, el contenido de Zn es de:

$$\frac{0{,}008\ kg\ Zn/día * 1000000}{0{,}259\ kg\ ST/día} = 1013{,}239\ mg\ Zn/kg\ ST$$

- Para la alternativa A4, el contenido de Zn en el digestado después de ser tratado con la tecnología de recirculación es de 13000 mg Zn/kg ST, puesto que no hay remoción de químicos-metales. Así pues, el contenido de Zn en el digestado después de ser tratado con la tecnología de recirculación es igual a la cantidad de Zn que sale de digestado.

- Para la alternativa A5, el contenido de químicos-metales puede ser eliminado en un 30%, por lo tanto, el contenido de Zn en el digestado después de ser tratado con la tecnología de maduración aerobia es de 1013,239 mg Zn/kg ST.

$$\frac{0{,}013\ \%\ P/P}{100} * 140\ kg/día = 0{,}018\ kg\ ST/día$$

Teniendo en cuenta que el contenido de agua es de:

$$140\ kg/día - 0{,}294\ kgST/día = 139{,}706\ kg\ H_2O/día$$

De modo que el agua que queda en el digestado es:

$$0{,}3 * 139{,}706\ kg\ H_2O/día = 41{,}912\ kg\ H_2O/día$$

Así pues:

$$\frac{41{,}912\ kg\ H_2O * 100}{70} = 59{,}874 kg\ de\ digestado/día$$

$$59{,}874\ kg/día - 41{,}912\ kg\ H_2O/día = 17{,}962\ kg\ ST/día$$

$$\frac{0{,}018\ kg\ ST/día * 1000000}{17{,}962\ kg\ ST/día} = 1013{,}239\ mg\ Zn/kg\ ST$$

- Para las alternativas A6, A7 y A8, el contenido de químicos-metales es igual al contenido de químicos-metales de las alternativas A2, A3 y A5 respectivamente.

CT2 - Contenidos microbiológicos: se ha cuantificado en UFC/kg el contenido microbiológico que presenta el digestado al ser tratado con las alternativas de postratamiento.

En el análisis de las condiciones higiénicas del digestado, los datos microbiológicos de Coliformes fecales en el digestado es del $1{,}7^7$ UFC/g. Este valor es superior al valor máximo permisible de la categoría B de biosólidos (2,00E +6 UFC/g de biosólido), según el Decreto 1287. Por lo tanto, no estaría permitido aplicar el digestado directamente al suelo.

Al aplicar las tecnologías de postratamiento, la cantidad de Coliformes fecales disminuye, de tal manera que:

- La alternativa A1, es una tecnología efectiva para la eliminación drástica de microorganismos patógeno (Varnedo, 2011), por lo que se ha estimado que eficiencia de eliminación es del 90%. Por lo tanto, el contenido de Coliformes fecales es de $1{,}70^{6}$ UFC/g.
- La alternativa A2, posee una eficiencia del 95% de efectividad en la remoción de microorganismos patógenos (Torres-Parra et al., 2013). Por lo tanto, el contenido de Coliformes fecales es de $8{,}50^{5}$ UFC/g.
- La alternativa A3, posee una eficiencia de eliminación de microorganismos patógenos del 99-100% (Droppelmann, Gaete and Miranda, 2009). Por lo tanto, el contenido de Coliformes fecales es de $1{,}70^{5}$ UFC/g.
- La alternativa A4, la capacidad de remoción de microorganismos patógenos es igual al contenido de microorganismos patógenos que sale del digestado. Por lo tanto, el contenido de Coliformes fecales es de $1{,}7^{7}$ UFC/g.
- La alternativa A5, su función principal es la eliminación de microorganismos patógenos, por lo que posee una alta capacidad de remoción de estos (Tzatchkov et al., 2007). Así pues, se ha estimado que su capacidad de eliminación de microorganismos patógenos es del 95%. Por lo tanto, el contenido de Coliformes fecales es de $8{,}50^{5}$ UFC/g.
- La alternativa A6, A7 y A8, poseen una eficiencia de eliminación de microorganismos patógenos del 95%, 99% y del 95% respectivamente. Por lo tanto, el contenido de Coliformes fecales es de $8{,}50^{5}$ UFC/g, $1{,}70^{5}$ UFC/g y $8{,}50^{5}$ UFC/g respectivamente.

CT3 - Contenido de materia seca: se ha cuantificado en % de materia seca (% MS) presente en el digestado después de ser tratado con las tecnologías de postratamiento.

En el análisis fisicoquímico del digestado, el contenido de Sólidos totales es de 2,1 g/kg. Teniendo en cuenta que se obtienen 140 kg/día de digestado del efluente del biodigestor, se puede estimar que (Metcalf & Eddy, 1995; Edwards, 1997; Milán *et al.*, 2002; Garg, Gupta and Satya, 2006; Iaconi *et al.*, 2017):

- La alternativa A1, el contenido de materia seca es del 0,21% MS.

$$\frac{140\ kg/día * 2{,}1 g/día}{1000} = 0{,}294\ kg\ ST/día$$

$$\frac{0{,}294\ kg\ ST/día * 100}{140\ kg/día} = 0{,}210\ \%\ MS$$

- La alternativa A2, el contenido de materia seca es del 0,031 % MS.
  El 0,251 kg/día es el 95% de sólidos en suspensión que se eliminan, aplicando un factor de corrección del 0,9. Por lo tanto, el 5% de sólidos en el digestado final es de:

$$0{,}294\ kg\ ST/día - 0{,}251 kg/día = 0{,}043\ kg\ ST/día$$

  El contenido de kg de agua/día en los sólidos totales es de:

$$140 kg/día - 0{,}294\ kg\ ST/día = 139{,}706\ kg\ H_2O/día$$

$$139{,}706\ kg\ H_2O/día + 0{,}043\ kg\ ST/día = 139{,}749\ kg\ de\ digestado/día$$

$$\frac{0{,}043\ kg\ ST/día * 100}{139{,}749\ kg/día} = 0{,}031\%\ MS$$

- La alternativa A3, el contenido de materia seca es del 60% MS (Milán *et al.*, 2002; Garg, Gupta and Satya, 2006).
  Asumiendo que las cenizas se mantienen, tenemos que:

$$0{,}294\ kg\ ST/día - 0{,}196\ kg\ SV/día = 0{,}098\ kg\ cenizas/día$$

De modo que el % TOC es de 36,430 %. Por ello, tenemos que:

$$\frac{36{,}430 * 0{,}294\ kg\ ST/día}{100} = 0{,}107\ kg\ TOC/día$$

Teniendo en cuenta que se retiene un 67,451% y se degrada el 32,549% (Milán *et al.*, 2002), tenemos que:

$$\frac{0{,}107\ kg\ TOC/día * 67{,}451}{100} = 0{,}072\ kg\ TOC/día\ en\ el\ producto$$

$$0{,}196 kg\ SV/día - 0{,}107\ kg\ TOC/día = 0{,}089\ kg\ MO/día\ (que\ no\ es\ C)$$

$$0{,}072\ kg\ TOC/día + 0{,}089\ kg\ MO/día = 0{,}161\ kg\ MO/día\ (que\ tiene\ el\ producto)$$

Por lo tanto, el 60% de los sólidos totales en el vermicompostaje es de:

$$0{,}098\ kg\ cenizas/día + 0{,}161\ kg\ MO/día = 0{,}259\ kg\ ST/día$$

$$\frac{0{,}259\ kg\ ST/día * 100}{60} = 0{,}432\ kg/día$$

$$\frac{0{,}259\ kg\ ST/día * 100}{0{,}432\ kg\ ST/día} = 60\ \%\ MS$$

- Para la alternativa A4, si se recircula el 50% del digestado, el contenido de materia seca al salir del biodigestor después de a ver recirculado el digestado es de 0,315 % MS.

$$\frac{140\ kg/día * 2{,}1 g/día}{1000} = 0{,}294\ kg\ ST/día$$

$$\frac{70\ kg/día * 2{,}1 g/día}{1000} = 0{,}147\ kg\ ST/día$$

$$0{,}294\ kg\ ST/día + 0{,}147\ kg\ ST/día = 0{,}441\ kg\ ST/día$$

$$\frac{0{,}441\ kg\ ST/día * 100}{140\ kg/día} = 0{,}315\ \%\ MS$$

- Para la alternativa A5, el contenido de materia seca es del 30 % MS.
  Teniendo en cuenta que el contenido en sólidos es de 30%, el contenido de kg de agua/día en los sólidos totales es de:

$$140kg/día - 0{,}294\ kg\ ST/día = 139{,}706\ kg\ H_2O/día$$

$$0{,}3 * 139{,}706\ kg\ H_2O/día\ = 41{,}912\ kg\ de\ H_2O/día\ (en\ el\ digestado)$$

$$\frac{41{,}912\ kg\ H_2O/día * 100}{70} = 59{,}874\ kg/día$$

$$59{,}874\ kg/día - 41{,}912\ kg\ H_2O/día = 17{,}962\ kg\ ST/día$$

$$\frac{17{,}962\ kg\ ST/día * 100}{59{,}874\ kg/día} = 30\ \%\ MS$$

- Para las alternativas A6, A7 y A8, el valor de materia seca es igual a las alternativas A2, A3 y A5, respectivamente.

CT4 - Contenido de nutrientes: se ha valorado de manera cuantitativa el mg/kg la cantidad de Nitrógeno total (NKT) presente en el digestado después de ser tratado con las alternativas de postratamiento.

Se ha escogido el valor del Nitrógeno total (NKT) como el macronutriente más representativo para el contenido de nutrientes. Así pues, el valor de NKT en el digestado es de 0,050 Kg NKT/día. Al aplicar las tecnologías de postratamiento del digestado, el contenido de nutrientes es de (Metcalf & Eddy, 1995; Edwards, 1997; Milán *et al.*, 2002; Garg, Gupta and Satya, 2006; Iaconi *et al.*, 2017):

- Para las alternativas A1, el contenido de NKT no varía por lo tanto se estima que el contenido de nutrientes es de 0,050 Kg NKT/día.
- La alternativa A2, el contenido de NKT es de 0,021 kg NKT/día.
  Sabiendo que el contenido de NH_4 en el digestado es de 114 mg NH_4/L, tenemos que:

$$\frac{114mgNH_4/L * 140kg/día}{1000000} = 0{,}016\ kg\ NH_4/día$$

$$0{,}050\ kg\ NKT/día - 0{,}016\ kg\ NH_4/día = 0{,}034\ kg\ Norg/día$$

$$0{,}034\ kg\ Norg/día - 0{,}294\ kg\ ST/día = 0{,}117Kg\ Norg/kg\ ST$$

$$0{,}117\ kg\ Norg/kg\ ST\ * 0{,}251\ kg\ ST/día = 0{,}029\ Kg\ Norg/día$$

El nitrógeno orgánico en el producto es de:

$$0{,}034\ kg\ Norg/día - 0{,}029\ kg\ Norg/día = 0{,}005\ kg\ Norg/día$$

Por ende el valor de NKT es de:

$$0{,}050\ kg\ Norg/día + 0{,}016\ kg\ NH_4/día = 0{,}021\ kg\ NKT/día$$

- Para la alternativa A3, el contenido de NKT es de 0,025 kg NKT/día. Teniendo en cuenta que el 50% se mineraliza, tenemos que:

$$\frac{0{,}036\ kg\ NKT/día}{100} * 140\ kg/día = 0{,}050\ kg\ NKT/día$$

$$\frac{0{,}050\ kg\ NKT/día}{2} = 0{,}025\ kg\ NKT/día$$

- Para la alternativa A4, el contenido de NKT es de 0,025 kg NKT/día.
  Se considera que se recircula el 50% del digestado, Por lo tanto:

$$\frac{0{,}036\ kg\ NKT/día}{100} * 140\ kg/día = 0{,}050\ kg\ NKT/día$$

$$\frac{0{,}050\ kg\ NKT/día}{2} = 0{,}025\ kg\ NKT/día$$

- Para la alternativa A5, el contenido de NKT es de 0,040 kg NKT/día, ya que el 80% se retiene en el producto.

$$\frac{0{,}036\ kg\ NKT/día}{100} * 140\ kg/día = 0{,}050\ kg\ NKT/día$$

$$0{,}8 * 0{,}050\ kg\ NKT/día = 0{,}040\ kg\ NKT/día$$

- Para la alternativa A6, A7 y A8, el contenido de NKT es igual al contenido de NKT de las alternativas A2, A3 y A5, respectivamente.

CT5 - pH: se ha valorado de manera cuantitativa el valor de pH del digestado después de ser tratado con las alternativas de postratamiento.

Todas las alternativas tienen valores de pH alrededor de 7, en línea con la normativa para el uso del digestado en agricultura.

CT6 - Conductividad eléctrica: se ha valorado de manera cuantitativa el valor de la conductividad eléctrica en dS/m, que se mide una vez el digestado ha sido tratado por las alternativas de postratamiento. Este valor no variará al inicial de 0,03 dS/m, puesto que las tecnologías de

postratamiento no influyen en la conductividad. Por ello, en este caso de estudio, la conductividad es un parámetro que no ayuda a diferenciar entre las alternativas.

CT7 - Producción biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado): se ha valorado de manera cuantitativa en m³ CH_4/kg SV el potencial de biometanización residual del digestado después del postratamiento.

Según los valores obtenidos de la valorización energética del digerido, el potencial de biometanización residual es de 0,058 m³ CH_4/kg SV.

- La alternativa A1, es una tecnología que principalmente recupera el biogás residual que se encuentra en el digestado. Por ello, dispone de un reservorio de almacenamiento de biogás. Así pues, se ha considerado que todo el biogás residual se produce, es decir, se estima que tiene un potencial de biometanización residual de 0,058 m³ CH_4/kg SV.
  Por ello, el potencial de biometanización en el digestado después del postratamiento es cerca de 0 m³ CH_4/kg SV, porque se ha producido en el interior del tanque de desgasificación.
- Las alternativas A2, A3 y A5 no disponen de un reservorio para almacenar el biogás residual que sale del biodigestor. Por lo tanto, la producción de biogás residual es 0 m³ CH_4/kg SV, ya que se pierde. Así mismo, la cantidad de metano soluble en el digestado una vez pretratado con las tecnologías, será similar a la inicial.
- La alternativa A4, cuando el digestado se almacena en un tanque y luego es recirculado, parte del biogás residual es retornado al inicio del biodigestor.
  Se ha considerado que se recircula un 50% del digestado. Sin embargo, se estima que un 10% del potencial de biometanización residual se pierde en el momento previo a la recirculación, al estar almacenado en el tanque abierto. Por lo tanto, se estima que tiene un potencial de biometanización residual de 0,029 m³ CH_4/kg SV.
- Las alternativas A6, A7 y A8, disponen del tanque de desgasificación al inicio del proceso, que sirve de reservorio para almacenar el biogás producido a la salida del biodigestor. Así pues, se estima que todo el biogás se produce y, por lo tanto, el potencial de biometanización residual de 0,0,058 m³ CH_4/kg SV.

CT 8 - Necesidad de personal cualificado: se ha cuantificado de manera cualitativa la capacitación que se requiere para el manejo de las alternativas. Se prioriza la tecnología que requiera menos personal cualificado para su construcción y manejo.

Se otorga (1) a muy baja complejidad y (5) a muy alta complejidad.

- La alternativa A1, A2 y A5, son tecnologías complejidad baja (2), ya que no requieren de equipos de alta tecnología para su manejo y por lo tanto no es necesario que el personal esté muy bien cualificado ('Universidad de cuenca', no date; Tzatchkov and Villagómez, 2007).
- La alternativa A3, es una tecnología de complejidad media (3), ya que el manejo de la tecnología requiere de atención y conocimiento para su correcto funcionamiento.
- La alternativa A4, es una tecnología de complejidad muy baja (1), ya que no se necesita personal cualificado para su manejo.

- Las alternativas A6, A7 y A8, son tecnologías que tienen una media (3) y alta (4) complejidad, porque tiene una mayor dificultad de construcción al ser alternativas compuestas por dos tecnologías y su manejo requiere de conocimientos previos.

CT9 - Facilidad de construcción e implementación: se ha valorado de manera cualitativa el grado de facilidad de su construcción e implementación. Teniendo en cuenta la disponibilidad local de los materiales y el personal especializado para la contracción. Se prioriza la tecnología que tenga una menor dificultad para su construcción e implementación.

Se otorga (1) a muy baja facilidad de construcción e implementación y (5) a muy alta facilidad de construcción e implementación.

- La alternativa A1 y A3, y A5, son tecnologías cuya construcción es sencilla y la obtención de parte de los materiales es local, incluso pueden reutilizarse al encontrarse en la misma comunidad, puesto que requieren de materiales como piedras o maderas, entre otros. Por ello se ha considerado que tienen una alta (4) facilidad de construcción e implementación (Acosta-Bedoya et al., 2013).
- La alternativa A2, es una tecnología cuya construcción es más compleja, puesto que la mezcla adecuada de sustratos de arenas y piedras asegura el correcto funcionamiento del filtro. Así mismo, los materiales necesarios para su construcción no pueden ser encontrados en la comunidad, ya que son específicos para el filtro y por lo tanto deben ser comprados. Así pues, se ha considerado que tiene una facilidad media (3) de construcción e implementación (Blancio-Ordoñez et al., 2011).
- La alternativa A4, es una tecnología con muy alta facilidad de construcción e implementación (5), ya que la recirculación se hace manualmente sin necesidad de construir una infraestructura para su funcionamiento, del mismo modo que tampoco es necesario comprar materiales para su construcción.
- Las alternativas A6, A7 y A8, son tecnologías con baja (2) y media (3) facilidad de construcción e implementación, puesto que son alternativas compuestas por dos tecnologías y su construcción se hace más compleja, al igual que la obtención local y de compra de los materiales.

CT10 - Facilidad de mantenimiento: se ha valorado de manera cualitativa el grado de facilidad de su mantenimiento y el personal necesario para su manejo. Se prioriza la tecnología que requiera menos horas al día para su gestión y mantenimiento.

Se otorga (1) a muy baja facilidad de mantenimiento y (5) a muy alta facilidad de mantenimiento.

- La alternativa A1 y A5, no requieren de una gran gestión y mantenimiento de las tecnologías, puesto que el digestado pasa directamente al tanque de desgasificación o la laguna de maduración. Por lo tanto, el grado de facilidad de mantenimiento es alto (4). (Tzatchkov et al., 2007).
- La alternativa A2, tiene un grado de facilidad de mantenimiento alto (4), puesto que su mantenimiento consiste en remover la capa superior de arena el filtro juntamente con el lecho biológico y lavarla manualmente (Acosta-Bedoya et al., 2013; Sumaro, 2009).
- La alternativa A3, tiene un grado de facilidad de mantenimiento medio (3), ya que, aunque las lombrices se desplacen libremente por el compost construyendo galerías

que airean el material, el aporte de restos debe ser diario o cada varios días, para mantener el contenido de materia orgánica y la humedad por encima del 70% (Vermican, 2019).

- La alternativa A4, tiene un grado de facilidad de mantenimiento media (3), puesto que la recirculación se realiza manualmente y por lo tanto, la supervisión y operación de mantenimiento es diaria.
- Las alternativas A6, A7 y A8, presentan un grado de facilidad de mantenimiento bajo (2) y medio (3), ya que son alternativas compuestas por dos tecnologías y por ende el mantenimiento es mayor.

CT11 - Necesidad de superficie: se ha valorado de manera cuantitativa en m² la superficie requerida por cada alternativa.

- Para las alternativas A1 y A5, se usa la misma superficie utilizada para la construcción de un biodigestor de polietileno. Teniendo en cuenta que el volumen del biodigestor es de 10 m³, la anchura del plástico utilizado para su construcción debe ser de 1,75 m, con un radio de 0,56 m y una sección de 0,97 m².
  Las bolsas utilizadas para la construcción del tanque de desgasificación y la maduración aerobia, están colocados en rasas semicavadas en el suelo con dimensiones de (0,6x0,8x0,9 m). Así pues, la superficie requerida para su construcción es de 8,25 m².
- Para la alternativa A2, considerando que litros de digestado del efluente del biodigestor son un total de 140 L/día, el barril de plástico cilíndrico debe tener unas dimensiones de 1,14 m de radio y una profundidad total de filtro de 1,20 m. De esta manera, el barril tiene un volumen total de 4,90 m³ , ya que el TRH es de 30 días. Así pues, la superficie requerida para su construcción es de 2,28 m².
- Para la alternativa A3, considerando que los litros de efluente del biodigestor son 140 L/día, el vermicompostador debe tener unas dimensiones de 3 m de largo por 1 m de ancho. Tiene una capacidad de 3 m³. Por lo tanto, la superficie requerida para su construcción es de 3 m².
- Para la alternativa A4., la recirculación se realiza manualmente. Por lo tanto la superficie requerida para su construcción es 0 m².
- Para las alternativas A6, A7 y A8, la superficie requerida será la suma de las dos alternativas compuestas.

CT12 - Vida útil: se ha valorado de manera cuantitativa en años la vida útil de cada alternativa, teniendo en cuenta la durabilidad de los materiales para la construcción de las tecnologías.

- Para la alternativa A1 y A5, se ha considerado una vida útil de 5 años para el polietileno usado como material para su construcción (Garfí *et al.*, 2016).
- Para la alternativa A2, se ha considerado que la renovación de la arena y gravas, así como del tanque cilíndrico de plástico, deben realizarse cada 8-10 años (Collins *et al.*, 2016).
- Para la alternativa A3, se ha considerado una vida útil de 5 años para las cajas de madera, ya que al someterse a humedades muy altas en el interior del vermicompostador, acelera su degradabilidad (Morillas, 2016).
- Para la alternativa A4, se ha considerado una vida útil de 10 años para el cubo de plástico para la recirculación manual.

- Para la alternativa A6, se ha considerado la media de los 5 años de vida del tanque de desgasificación de polietileno entre los 8-10 años de vida del tanque de plástico del filtro de arena. Por lo tanto se ha estimado que la vida útil es de 7 años.
- Para la alternativa A7, se ha considerado una vida útil de 5 años, puesto que las alternativas A1 y A3 tienen esa durabilidad.
- Para la alternativa A8, se ha considerado una vida útil de 5 años, puesto que las alternativas A1 y A5 tienen es a durabilidad.

En la siguiente tabla (tabla 7.7) se describen los datos de entrada de los Criterios Ambientales:

Subcriterios		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Unidades	+/-
CA1	Generación de residuos	0	0	0	0	0	0	0	0	m^3	-
CA2	Emisiones al aire (partículas)	0	0	0	0	0	0	0	0	Cualitativo 1 a 5	-
CA3	Emisiones al suelo	0	0	0	0	0	0	0	0	mg/kg	-
CA4	Emisiones al agua	0	0	0	0	0	0	0	0	mg/L	-
CA5	Emisiones de olores	0	3	2	2	3	2	1	2	Cualitativo 1 a 5	-
CA6	Emisiones de gases de efecto invernadero	0	0	4	2	4	0	3	3	Cualitativo 1 a 5	-
CA7	Generación de aerosoles (patógenos)	0	0	0	0	0	0	0	0	Cualitativo 1 a 5	-
CA8	Sostenibilidad de los materiales	3	3	4	5	3	3	4	3	Cualitativo 1 a 5	+
CA9	Consumo de agua	105	105	105	52,5	105	105	105	105	L/día	-
CA10	Consumo de energía	0	0	0	0	0	0	0	0	kW/h	-

Tabla 7.7. Datos de entrada para la aplicación de un caso real para los Criterios Ambientales

CA1 - Generación de residuos: se ha valorado de manera cuantitativa en m^3 la cantidad de residuos generados una vez aplicada la tecnología.

Al ser tecnologías de bajo coste pensadas para el aprovechamiento de un residuo orgánico, se ha considerado que no generan residuos o que los residuos que generan en cantidades mínimas pueden ser reutilizados.

CA2 - Emisiones al aire (partículas): se ha valorado de manera cuantitativa la cantidad de emisiones de partículas.

Se ha considerado que no hay emisiones de material particulado en el uso de las tecnologías de postratamiento. Esto se debe a que las alternativas A1, A2, A3, A6 y A7 son tecnologías que permanecen selladas. Así mismo, la alternativa A4, A5 y A8, son alternativas que no se aplica agitación y por lo tanto, aunque están abiertas al aire libre, no generan partículas.

CA3 - Emisiones al suelo: se ha cuantificado de manera cuantitativa en mg de compuesto/kg de suelo, la contaminación del suelo por filtración.

Se ha considerado que todas las alternativas son tecnologías impermeabilizadas, capaces retener aquellas sustancias nocivas que puedan filtrase generando así degradación microbiana, absorción en las raíces de plantas y degradación química. Por lo tanto, las emisiones al suelo son 0 mg/kg.

CA4 - Emisiones al agua: se ha cuantificado de manera cuantitativa en mg/L de agua, la contaminación al agua que pueden generar las tecnologías.

Se ha considerado que todas las alternativas están pensadas para la reutilización de un residuo que, antes de ser aplicado como fertilizante orgánico, puede ser dañino para los ecosistemas contaminando acuíferos. Por ello, cada tecnología tiene un sistema impermeable que no permite la filtración de sustancias nocivas dañinas para las aguas superficiales y subterráneas.

CA5 - Emisiones de olores: se ha valorado de manera cualitativa las emisiones por olores que pueden generar las tecnologías. Se prioriza la tecnología que genere menores cantidad de gases contaminantes odoríferos.

Se otorga (1) a muy baja generación de emisiones de olores y (5) a muy alta generación de emisiones de olores.

- La tecnología A1, es una tecnología que no genera emisiones de olores (0), ya que dispone de un sistema cerrado para la recuperación de biogás. En consecuencia, el digestado no está en contacto con la atmosfera y por ende, no puede emitir gases contaminantes odoríferos.
- La tecnología A2, es una tecnología que tiene una cierta capacidad de remoción de olores en del agua filtrada (Maldonado, 2004), por lo que se ha estimado que la generación de olores es media (3).
- La tecnología A3, es una tecnología que dispone de un sistema que no genera olores debido a la rápida descomposición que realizan las lombrices. Sin embargo, se añaden más restos de los requeridos, se corre el riesgo de que los materiales se composten generando olores debido a la ausencia de oxígeno (Santos et al., 2013; Vermican, 2019). Por ello, se ha considerado que la generación de olores es baja (2).
- La tecnología A4 es una tecnología con alta capacidad de aireación, por lo que no debería generar olores. Sin embargo, en el momento de retener el digestado en el tanque abierto, antes de ser recirculado, podría a ver cierta cantidad de emisiones al aire. De este modo, se ha considerado que las emisiones de olores son bajas (2).
- La tecnología A5, es una tecnología aireada donde no se deben detectar olores (Aguilar, 2009). Sin embargo, la sobrecarga orgánica, pude generar emisiones de sulfuro de

hidrógeno que se emite directamente a la atmósfera. Por esta razón, se ha considerado que la generación de emisiones de olores es media (3).

- La tecnología A6, es una tecnología que dispone del tanque de desgasificación y el filtro de arena para retener los gases contaminantes odoríferos. Estas dos tecnologías captan entera y parcialmente estas emisiones de olores. Por lo tanto, se ha considerado que la generación de emisiones de olores es baja (2).
- Las tecnologías A7 y A8, son alternativas compuestas por dos tecnologías que retienen los gases contaminantes odoríferos entera y parcialmente. De este modo, se ha considerado que la generación de olores es muy baja (1) y baja (2), respectivamente.

CA6 - Emisiones de gases de efecto invernadero: se ha valorado de manera cualitativa las emisiones de gases de efecto invernadero emitidas por las tecnologías. Se ha considerado solo las emisiones de CH_4 y CO_2. Se prioriza la tecnología que tenga menor contribución al cambio climático por emisiones directas de gases de efecto invernadero.

Se otorga (1) a muy bajas emisiones de gases de efecto invernadero y (5) a muy altas emisiones de gases de efecto invernadero.

- Para la alternativa A1, se ha considerado que las emisiones de CH_4 y CO_2, son nulas (0), puesto que es una tecnología que dispone de un reservorio para la producción residual de biogás y por lo tanto, no genera gases de efecto invernadero que se emiten a la atmosfera.
- Para la alternativa A2 y A6, se ha considerado que las emisiones de CH_4 y CO_2 son nulas (0), puesto que son tecnologías que disponen de un sistema cerrado donde teóricamente no puede haber emisiones de CH_4 y CO_2 a la atmosfera.
- Para la alternativa A3, A5, A7 y A8, se ha considerado que las emisiones de CH_4 y CO_2 pueden ser altas (4) para las alternativas A3 y A5, y medias (3) para las alternativas A7 y A8, debido a que no se recupera el CH_4 y por lo tanto se emite directamente a la atmosfera.
- La alternativa A4, es una tecnología donde antes de recircular el digestado dentro el biodigestor, permanece por un tiempo en un tanque donde puede generar emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello se ha considerado que las emisiones de gases de efecto invernadero son bajas (2).

CA7 - Generación de aerosoles (patógenos): se ha considerado de manera cualitativa la generación de aerosoles patógenos que pueden generar las tecnologías.

Se ha considerado que no hay generación de aerosoles (patógenos) puesto que las alternativas A1, A2, A3, A4, A6 y A7 son tecnologías que permanecen selladas. Así mismo, la alternativa A5 y A8, son alternativas que no se aplica agitación y por lo tanto, aunque están abiertas al aire libre, no generan aerosoles que puedan contener patógenos.

CA8 - Sostenibilidad de los materiales: se ha valorado de manera cualitativa los materiales empleados para la construcción de las tecnologías, así como sus cantidades, su disponibilidad local (si los materiales pueden ser conseguidos localmente o deben ser comprados) y la vida útil de cada tecnología. Se prioriza la tecnología que utilice materiales sostenibles.

Se otorga (1) a muy baja sostenibilidad de materiales y (5) a muy alta sostenibilidad de materiales.

En la tabla 7.8 se ha valorado de manera cualitativa cada alternativa en función de la cantidad, la disponibilidad y la vida útil de los materiales empleados para cada tecnología:

Alternativa	Material	Cantidad de material	Disponibilidad	Vida útil (años)	Valoración cualitativa
A1	Polietileno para el tanque	20 m²	Compra	5	3
	Piedras	25 bolsas	Local		
A2	Barril de plástico	16,76 m²	Compra	8-10	3
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas	20 kg	Compra		
A3	Cajas de madera	1,5 m²	Local	5	4
	Lombrices	1 kg	Compra		
	Sustrato	-	Local		
A4	Cubo de plástico	10 L	Local	10	5
A5	Bolsa de polietileno	20 m²	Compra	5	3
	Piedras	30 bolsas	Local		
A6	Polietileno para el tanque	20 m²	Compra	5	3
	Piedras	20 bolsas	Local		
	Barril de plástico	16,76 m²	Compra		
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas	20 (kg)	Compra		
A7	Polietileno para el tanque	20 m²	Compra	5	4
	Piedras	20 bolsas	Local		
	Cajas de madera	14 m²	Local		
	Lombrices	1 kg	Compra		
	Sustrato	3 m³	Compra		
A8	Polietileno para el tanque	20 m²	Compra	5	3
	Piedras	20 bolsas	Local		
	Bolsa de polietileno	20 m²	Compra		

Tabla 7.8. Sostenibilidad de los materiales empleados en cada alternativa

CA9 - Consumo de agua: se ha valorado de manera cuantitativa en L/día de agua requerida para el funcionamiento de cada tecnología. Al ser alternativas alimentadas con digestado líquido, el consumo de agua es nulo.

- Para las alternativas A1, A2, A3, A5, A6, A7 y A8, se ha considerado que los litros de agua requeridos para el funcionamiento de las tecnologías, es la cantidad de agua utilizada

para alimentar el sistema, es decir, el agua requerida para alimentar el biodigestor y, posteriormente obtener el digestado para ser tratado por las tecnologías de postratamiento.
Así pues, los litros de agua requeridos para el funcionamiento de las tecnologías son de 105 L/día.

- Para la alternativa A4, se ha considerado que los litros de agua requeridos para el funcionamiento de la tecnología son de 52,5 L/día, puesto que se considera una recirculación del digestado del 50%.

CA10 - Consumo de energía: se ha valorado de manera cuantitativa en kW/h de energía requerida para el funcionamiento de cada tecnología.

Al ser alternativas muy sencillas no requieren de bombas ni otros dispositivos para su implementación y posterior funcionamiento. Por ello se ha considerado que el consumo de energía es de 0 kW/h.

En la siguiente tabla se describen los datos de entrada de los Criterios Económicos:

Subcriterios		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Unidades	+/-
CE1	Inversión inicial (Capacidad de pago)	80	145	5,5	0	80	225	85,5	150	$	-
CE2	Coste de mantenimiento	320	323,35	36,69	0	320	900	342	600	$/20 años	-
CE3	Generación de ingresos	2	4	4	3	4	4	4	4	Cualitativo 1 a 5	+
CE4	Capacidad de ahorro	5	4	4	3	4	5	5	5	Cualitativo 1 a 5	+

Tabla 7.9. Datos de entrada para la aplicación de un caso real para los Criterios Económicos

CE1 - Inversión inicial (capacidad de pago): se ha valorado de manera cuantitativa en $ la inversión realizada para la instalación de las alterativas.

No se dispone de los datos de inversión inicial de las alternativas propuestas, por lo que en la tabla 7.10 se ha estimado el coste de inversión inicial de los materiales utilizados y sus cantidades, para la construcción de las tecnologías (Acosta-Bedoya, 2013; Garfí *et al.*, 2019):

Alternativa	**Material**	**Cantidad**	**Coste material ($)**	**Inversión inicial ($)**
A1	Polietileno para el tanque	20 m²	80	80
	Piedras	20 bolsas	0	
A2	Barril de plástico	16,76 m²	45	145
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas	20 kg	100	
A3	Cajas de madera	14 m²	0	5,5
	Lombrices	1 kg	5,5	
	Sustrato	-	0	
A4	Cubo de plástico	10 L	0	0

A5	Bolsa de polietileno	20 m²	70	80
	Piedras	20 bolsas	0	
A6	Polietileno para el tanque	20 m²	80	225
	Piedras	20 bolsas	0	
	Barril de plástico	16,76 m²	45	
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas	20 (kg)	100	
A7	Polietileno para el tanque	20 m²	80	85,5
	Piedras	20 bolsas	0	
	Cajas de madera	14 m²	0	
	Lombrices	1 kg	5,5	
	Sustrato	3 m³	0	
A8	Polietileno para el tanque	20 m²	80	150
	Piedras	20 bolsas	0	
	Bolsa de polietileno	20 m²	70	

Tabla 7.10_. Inversión inicial (capacidad de pago) de cada alternativa

En la tabla 10.10, aquellos costes de material cuyo valor es 0 $, es debido a que su obtención es local y se ha considerado que pueden ser adquiridos dentro de la propia comunidad o familia, por lo que no hay coste de compra.

El valor de una unidad de arena y gravas es de 5 $. Por lo tanto, se estima que por 20 kg de arena y gravas el coste es de 100 $ (Garfí *et al.*, 2019).

CE2 - Coste de mantenimiento: se ha valorado de manera cuantitativa en $ el coste de mantenimiento de cada alternativa.

El coste de mantenimiento de cada alternativa se ha estimado considerando el coste inicial ($) de los materiales utilizados para cada tecnología y se ha establecido un periodo de 20 años para todas las alternativas.

En la tabla 7.11 se observa el coste de mantenimiento en $ de cada alternativa:

Alternativa	Material	Vida útil (años)	Gastos por 20 años	Inversión inicial ($)	Coste de mantenimiento ($)
A1	Polietileno para el tanque	5	4	80	320
	Piedras				
A2	Barril de plástico	9	2,23	145	323,35
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas				
A3	Cajas de madera	3	6,67	5,5	36,69
	Lombrices				
	Sustrato				
A4	Cubo de plástico	10	2	0	0
A5	Bolsa de polietileno	5	4	80	320

	Piedras				
A6	Polietileno para el tanque	7	4	225	900
	Piedras				
	Barril de plástico				
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas				
A7	Polietileno para el tanque	5	4	85,5	342
	Piedras				
	Cajas de madera				
	Lombrices				
	Sustrato				
A8	Polietileno para el tanque	5	4	150	600
	Piedras				
	Bolsa de polietileno				

Tabla 7.11. Coste de mantenimiento de cada alternativa

CE3 - Generación de ingresos: se ha valorado de manera cualitativa la generación de ingresos que puede generar cada alternativa. Se prioriza la tecnología que pueda dar un beneficio económico mayor.

Se otorga (1) a muy baja generación de ingresos y (5) a muy alta generación de ingresos.

- La alternativa A1, se ha considerado que tiene una generación de ingresos baja (2), ya que el biogás residual producido no se vende y por lo tanto las ganancias no son altas.
- La alternativa A2, A5, A6 y A8, se ha considerado que tiene una generación de ingresos alta (4), debido a que el efluente líquido que sale de las tecnologías de postratamiento puede ser aplicado como biofertilizante en el campo y por lo tanto, generar una producción de cultivos mayor y venderlo.
- La alternativa A3 y A7, se ha considerado que tiene una generación de ingresos alta (4), puesto que el humus generado y el lixiviado que sirve como abono líquido, pueden ser vendidos.
- La alternativa A4, se ha considerado que tiene una generación de ingresos media (3).

CE4 - Capacidad de ahorro: se ha valorado de manera cualitativa la capacidad de ahorro que puede tener cada alternativa. Se prioriza la tecnología que evite un gasto.

Se otorga (1) a muy baja capacidad de ahorro y (5) a muy alta capacidad de ahorro.

- Las alternativas A1, A6, A7 y A8, generan una cantidad de biogás residual que puede ser utilizado como combustible. Con el biogás producido en el biodigestor, una familia se ahorra hasta el 80% del combustible utilizado para cocinar (Garfí *et al.*, 2019). Así pues, con el biogás residual obtenido de las alternativas, el ahorro de combustible es mayor al 80%. Por lo tanto, se ha considerado que la capacidad de ahorro es muy alta (5).
- La alternativa A2 y A3, se ha considerado que la capacidad de ahorro es alta (4), debido al uso de los lixiviados con efecto fertilizante de mayor calidad, producidos por el filtro de arena y el vermicompostaje.
- La alternativa A4, se ha considerado que la capacidad de ahorro es media (3), ya que la recirculación del 50% del digestado, genera la mitad de digestado útil para ser aplicado como fertilizante orgánico y, por lo tanto, sustituye en parte el uso de fertilizantes convencionales.

- La alternativa A5, se ha considerado que tiene una capacidad de ahorro alta (4), ya que con la aplicación del digestado pretratado, se obtiene un fertilizante de mayor calidad y por lo tanto se puede ahorrar hasta el 80% de fertilizantes convencionales (Garfí *et al.*, 2019).

En la siguiente tabla se describen los datos de entrada de los Criterios Sociales:

Subcriterios		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Unidades	+/-
CS1	Mejoramiento de las condiciones de vida	5	5	5	5	5	5	5	5	Cualitativo 1 a 5	+
CS2	Grado de aceptación	4	2	2	4	3	2	2	3	Cualitativo 1 a 5	+
CS3	Equidad de género	5	5	5	5	5	5	5	5	Cualitativo 1 a 5	+
CS4	Beneficios en la salud	5	4	5	4	4	4	5	4	Cualitativo 1 a 5	+

Tabla 7.12. Datos de entrada para la aplicación de un caso real para los criterios del aspecto Social

CS1 - Mejoramiento de las condiciones de vida: se ha valorado de manera cualitativa el grado de mejora en las condiciones de vida de la comunidad o familia.

Se otorga (1) a muy bajo mejoramiento de las condiciones de vida y (5) a muy alto mejoramiento de las condiciones de vida.

Todas las alternativas mejoran las condiciones de vida de la familia o comunidad, por lo que se ha considerado que las puntuaciones de todas las alternativas son de muy alto mejoramiento de las condiciones de vida (5). Así pues, este criterio no discrimina entre alternativas.

CS2 - Grado de aceptación: se ha valorado de manera cualitativa el grado de aceptación de las tecnologías en su contexto actual y cultural.

Se otorga (1) a muy bajo grado de aceptación y (5) a muy alto grado de aceptación.

- Para las tecnologías A1 y A4, son tecnologías usualmente más utilizadas en contextos rurales donde el aprovechamiento del digestado y el biogás residual es un añadido a los beneficios de la familia o comunidad. Así mismo, su baja complejidad las hace unas tecnologías accesibles para los usuarios de la comunidad sin requerir grandes esfuerzos ni formación para su utilización. De este modo, se ha considerado que el grado de aceptación de dichas tecnologías es alto (4).
- Para las tecnologías A5 y A8, se ha considerado un grado de aceptación medio (3), puesto que requiere de un mínimo de atención y formación para monitorear el uso de las tecnologías. A demás, aunque el aprovechamiento del digestado es alto, no se recupera el biogás residual del digestado.
- Para las tecnologías A2, A3, A6 y A7, se ha considerado un grado de aceptación bajo (2), ya que son tecnologías actualmente poco utilizadas, si requieren de atención diaria para su funcionamiento y mantenimiento. A demás, no disponen de un sistema de recuperación del biogás residual.

CS3 - Equidad de género: se ha valorado de manera cualitativa el grado de sesgo de género y que respete/mejore las condiciones de las mujeres.

Se otorga (1) a muy baja equidad de género y (5) a muy alta equidad de género.

Todas las alternativas mejoran las condiciones de las mujeres en la implementación y uso de las tecnologías, así como la equidad entre géneros. Por ello, se ha considerado que todas las alternativas son de muy alta equidad de género (5). Así pues, este criterio no discrimina entre alternativas.

CS4 - Beneficios en la salud: se ha valorado de manera cualitativa el grado de beneficios en la salud humana y menor afectación debido al manejo y/o exposición constante al uso del digestado de cada tecnología.

- Para las alternativas A1, A3 y A7 son tecnologías que precisan de poco o ningún manejo a la hora de ejecutarse, por lo que su afectación a la salud humana en cuanto a trabajo físico, contacto directo con el digestado, inhalación de olores y partículas, es nulo. Así pues, se ha considerado que el grado de beneficio en la salud es muy alto (5).
- Para las alternativas A2, A4, A5, A6 y A8, su ejecución requiere de cierto trabajo físico y estar en contacto directo con el digestado realizando tareas de monitoreo y mantenimiento, así como estar expuestos directamente a la inhalación de partículas y olores que se liberan al ejecutar las tecnologías. Por ello, se ha considerado que el grado de beneficio en la salud es alto (4).

7.1.3. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

En la tabla 7.13 se muestran los criterios identificados para la toma de decisiones, sus pesos y sus valores ideales y no ideales, según si el criterio tiene el valor óptimo en el máximo posible (+) o el mínimo posible (-).

Para facilitar la comprensión se organizan según los aspectos, criterios y subcriterios elegidos anteriormente:

Aspecto	Criterio	Subcriterio		Peso	+/-	Valor ideal	Valor no ideal
	Características digestato (Cantidad y calidad)	CT1	Contenidos químicos-metales	0,031	-	1013,239	31604
		CT2	Contenidos microbiológicos	0,037	-	170000	17000000
		CT3	Contenido de materia seca	0,028	+	60	0,031
		CT4	Contenido de nutrientes	0,038	+	0,05	0,021
		CT5	pH	0,033		7	7

Técnico		CT6	Conductividad eléctrica	0,028		0,03	0,03
		CT7	Producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado)	0,035	+	0,058	0
	Gestión	CT8	Necesidad de personal cualificado	0,029	-	1	4
		CT9	Facilidad de construcción e implementación	0,034	+	5	2
		CT10	Facilidad de mantenimiento	0,039	+	4	2
	Disponibilidad de superficie	CT11	Necesidad de superficie	0,027	-	0	16,5
	Vida útil	CT12	Vida útil	0,032	+	10	5
Ambiental	Contaminación	CA1	Generación de residuos	0,025	-	0	0
		CA2	Emisiones al aire (partículas)	0,027	-	0	0
		CA3	Emisiones al suelo	0,030	-	0	0
		CA4	Emisiones al agua	0,035	-	0	0
		CA5	Emisiones de olores	0,032	-	0	3
		CA6	Emisiones de gases de efecto invernadero	0,032	-	0	4
		CA7	Generación de aerosoles (patógenos)	0,037	-	0	0
	Consumo de recursos	CA8	Sostenibilidad de los materiales	0,033	+	5	3
		CA9	Consumo de agua	0,037	-	52,5	105
		CA10	Consumo de energía	0,031	-	0	0
Económico	Coste	CE1	Inversión inicial (Capacidad de pago)	0,038	-	0	225

		CE2	Coste de mantenimiento	0,033	-	0	900
	Beneficios	CE3	Generación de ingresos	0,034	+	4	2
		CE4	Capacidad de ahorro	0,035	+	5	3
Social	Condiciones de vida	CS1	Mejoramiento de las condiciones de vida	0,039	+	5	5
	Aceptación de la tecnología	CS2	Grado de aceptación	0,040	+	4	2
	Género	CS3	Equidad de género	0,035	+	5	5
	Salud	CS4	Beneficios en la salud	0,036	+	5	4

Tabla 7.13. Pesos y valores ideales y no ideales de los criterios seleccionados

Los criterios más importantes están relacionados con los Criterios Técnicos, incluyendo: contenido microbiológico (CT2) con peso de 0,037, el cual las tecnologías no pueden ser implementadas si los valores microbiológicos no se mantienen por debajo los niveles establecido por el Decreto 1287 (Real Decreto nº 1287, 2014); contenido de nutrientes (CT4) con peso 0,038, el cual no tendrá sentido aplicar las tecnologías y posteriormente aplicar el digestado como fertilizante orgánico, si el contenido de nutrientes disminuye o las cantidades son insuficientes para aumentar la productividad de los cultivos; producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado) (CT7) con peso de 0,035, el cual la recuperación de todo el biogás residual que haya en el digestado, puede suponer un mayor ahorro en energía, no consumir otros combustibles y la mejora de la salud humana; facilidad de mantenimiento (CT10) con peso de 0,039, el cual la complejidad de las tecnologías y su uso determinaran la aceptación de estas y su fácil adaptación a las condiciones y capacidades de los usuarios;

Así mismo, también los Criterios Sociales son muy importantes. En estos se incluyen todos: mejoramiento de las condiciones de vida (CS1) con peso de 0,039 y beneficios en la salud (CS4) con peso de 0,036, por el cual sin la implementación de las tecnologías, se seguirá utilizando combustibles o fertilizantes convencionales que provocan altas concentración de contaminantes perjudiciales para la salud humana y los ecosistemas; aceptación de la tecnología (CS2) con peso de 0,040, es el criterio con más peso, por el cual, su no aceptación en la comunidad implica no implementar las tecnologías y en consecuencia no rentabilizar al máximo el uso del digestado para obtener ganancias técnicas, ambientales, económicas y sociales. Por último, el criterio equidad de género (CS3) con peso de 0,035, por el cual la implementación de las tecnologías puede suponer un mejoramiento en las condiciones de vida de las mujeres.

A demás, algunos de los Criterios Ambientales y Económicos son: consumo de agua (CA9) con peso de 0,037, el cual sin la disponibilidad de agua o digestado líquido que sustituya los litros de agua necesarios para la implementación de las tecnologías, no es viable implementarlas; inversión inicial (CE1) con peso de 0,038, por el cual sin la capacidad de pago de las tecnologías no tendrían opción a su implementación y su posterior generación de ingresos.

Los valores ideales y antiideals se han obtenido de los datos de entrada de cada alternativa, es decir, coinciden con el valor mínimo o el valor máximo que se le da a cada criterio en función de las alternativas.

Cuando el valor ideal es el valor mínimo de cada criterio en función de las alternativas, significa que se ha dado el valor óptimo al mínimo posible (-). Así mismo, cuando el valor ideal se ha dado al valor máximo de cada criterio en función de las alternativas, significa que se ha dado el valor óptimo al máximo posible (+).

En la tabla 7.14 se muestran los resultados todos los indicadores con las ponderaciones generales. En la parte final de la tabla se muestra el valor de L_1, $L\infty$ y la semisuma Lf final.

En la tabla 7.14 se han evaluado las distintas alternativas considerando los criterios y subcriterios definidos y ponderados:

Subcriterios		+/-	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
CT1	Contenidos químicos-metales	-	0,012	0,003	0,031	0,012	0,000	0,003	0,031	0,000
CT2	Contenidos microbiológicos	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CT3	Contenido de materia seca	+	0,028	0,028	0,000	0,028	0,014	0,028	0,000	0,014
CT4	Contenido de nutrientes	+	0,000	0,038	0,033	0,033	0,013	0,038	0,033	0,013
CT5	pH		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CT6	Conductividad eléctrica		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CT7	Producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado)	+	0,000	0,035	0,035	0,017	0,035	0,000	0,000	0,000
CT8	Necesidad de personal cualificado	-	0,010	0,010	0,019	0,000	0,010	0,019	0,029	0,019
CT9	Facilidad de construcción e implementación	+	0,011	0,023	0,011	0,000	0,011	0,034	0,023	0,023
CT10	Facilidad de mantenimiento	+	0,000	0,000	0,019	0,019	0,000	0,019	0,039	0,019
CT11	Necesidad de superficie	-	0,014	0,004	0,005	0,000	0,014	0,018	0,019	0,027
CT12	Vida útil	+	0,032	0,006	0,032	0,000	0,032	0,019	0,032	0,032
CA1	Generación de residuos	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CA2	Emisiones al aire (partículas)	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CA3	Emisiones al suelo	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CA4	Emisiones al agua	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CA5	Emisiones de olores	-	0,000	0,032	0,021	0,021	0,032	0,021	0,011	0,021
CA6	Emisiones de gases de efecto invernadero	-	0,000	0,000	0,032	0,016	0,032	0,000	0,024	0,024
CA7	Generación de aerosoles (patógenos)	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CA8	Sostenibilidad de los materiales	+	0,033	0,033	0,017	0,000	0,033	0,033	0,017	0,033
CA9	Consumo de agua	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CA10	Consumo de energía	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CE1	Inversión inicial (Capacidad de pago)	-	0,014	0,025	0,001	0,000	0,014	0,038	0,015	0,026
CE2	Coste de mantenimiento	-	0,012	0,012	0,001	0,000	0,012	0,033	0,013	0,022

CE3	Generación de ingresos	+	0,034	0,000	0,000	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000
CE4	Capacidad de ahorro	+	0,000	0,018	0,018	0,035	0,018	0,000	0,000	0,000
CS1	Mejoramiento de las condiciones de vida	+	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CS2	Grado de aceptación	+	0,000	0,040	0,040	0,000	0,020	0,040	0,040	0,020
CS3	Equidad de género	+	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CS4	Beneficios en la salud	+	0,000	0,036	0,000	0,036	0,036	0,036	0,000	0,036
L_1			0,200	0,342	0,315	0,235	0,325	0,381	0,323	0,331
$L\infty$			0,034	0,040	0,040	0,036	0,036	0,040	0,040	0,036
Lf			**0,117**	**0,191**	**0,177**	**0,136**	**0,181**	**0,210**	**0,181**	**0,184**

Tabla 7.14. Evaluación de las alternativas: datos de entrada y distancias de L_1, $L\infty$ y Lf.

En la tabla 7.14 se muestran los resultados obtenidos de cada criterio, así como el valor óptimo del subcriterio, siendo el máximo posible (+) o el mínimo posible (-).

Los resultados han confirmado que la alternativa con menor distancia Lf de la solución ideal es la alternativa A1 (0,117), seguido por la alternativa A4 (0,138), con muy poca diferencia entre ellas. Seguidamente, las alternativas A3 (0,177), A5 (0,181), A7(0,181) y A8 (0,184) con valores muy similares entre ellas. Finalmente, las alternativas A2 (0,191) y A6 (0,210) con una distancia mayor al valor óptimo.

Estos resultados están fuertemente influenciados por Criterios Técnicos de: contenido de químicos-metales (CT1), contenidos microbiológicos (CT2), contenido de nutrientes (CT4), producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado) (CT7), facilidad de construcción e implementación (CT9) y facilidad de mantenimiento (CT10).

Así mismo, la influencia de criterios ambientales como: emisiones al aire (partículas) (CA2), sostenibilidad de los materiales (CA8), realzan la importancia de utilizar tecnologías que no tengan un gran impacto ambiental para la zona, donde la utilización de materiales locales puede suponer una gran diferenciación en la implementación de las alternativas.

Por otra parte, la influencia de los criterios económicos: inversión inicial (capacidad de pago) (CE1), coste mantenimiento (CE2) y generación de ingresos (CE3). Por último, todos los criterios sociales tienen una gran influencia en la elección de la alternativa A1 como la alternativa con menor distancia a la solución ideal: mejoramiento de las condiciones de vida (CS1), grado de aceptación (CS2), equidad de género (CS3) y beneficios en la salud (CS4).

Si bien las alternativas A1, A4, han obtenido los mejores resultados similares entre sí, para su posible implementación para el postratamiento del digesto, la alternativa A1 del tanque de desgasificación es la mejor tecnología para implementar en zonas rurales de Colombia.

En la tabla 7.15, se han evaluado las distintas alternativas considerando los criterios y subcriterios definidos y ponderados, en función del perfil de los participantes:

	Alternativas							
Perfil	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**	**A7**	**A8**
General	**0,117**	**0,191**	**0,177**	**0,136**	**0,181**	**0,210**	**0,181**	**0,184**
Técnico	**0,042**	**0,061**	**0,056**	**0,042**	**0,058**	**0,072**	**0,061**	**0,063**
Profesor/investigador	**0,066**	**0,107**	**0,101**	**0,078**	**0,100**	**0,118**	**0,104**	**0,102**
Otros	**0,013**	**0,023**	**0,021**	**0,018**	**0,023**	**0,024**	**0,021**	**0,022**
Contexto Biodigestores Si	**0,096**	**0,156**	**0,144**	**0,109**	**0,149**	**0,172**	**0,148**	**0,151**
Contexto Biodigestores No	**0,022**	**0,036**	**0,033**	**0,027**	**0,032**	**0,039**	**0,034**	**0,033**

Tabla 7.15. Evaluación de las alternativas según perfil del participante: Lf.

En la tabla 7.15 se muestran los resultados de Lf según el perfil profesional de los participantes y según el contexto de utilización de biodigestores.

Se puede observar que para todos los perfiles profesionales de los participantes y el contexto de utilización de biodigestores, las alternativas con una distancia menor a la ideal son las alternativas (A1) tanque de desgasificación y (A4) recirculación del digestado. La distancia que

hay entre las alternativas A1 y A4 es muy baja, por lo que ambas tecnologías podrían resultar exitosas en su implementación.

Por otra parte, todos los participantes coinciden en que la alternativa que presenta una distancia mayor a la ideal es la alternativa (A6) tanque de desgasificación + filtro de arena. Esto se debe principalmente a su alto coste de inversión inicial (CE1) y el coste de mantenimiento (CE2), puesto que los materiales no se pueden obtener localmente y tienen una vida útil relativamente menor con respecto a las otras tecnologías. Por lo tanto, estos criterios encarecen significativamente el coste de la tecnología.

Por lo tanto, discriminar entre perfiles profesionales de los participantes y el contexto de utilización de biodigestores, no resulta relevante para considerar la alternativa (A1) tanque de desgasificación como la mejor tecnología para tratar el digestado.

7.2. CASO ESTUDIO 2

El Caso de estudio 2, hay implementado un biodigestor de bajo coste que se alimenta con estiércol de cerdo.

En la siguiente tabla (tabla 7.16) se observan las características de diseño del biodigestor de bajo coste:

Parámetros biodigestor	Valor
Longitud (m)	30
Diámetro (m)	2,5
Volumen total (m^3)	101,25
Volumen de operación (m^3)	70,87
HRT (días)	24,34
OLR (kg VS/m^3_{op}*d)	0,5
Relación estiércol:agua lluvia (V:V)	1:6
Estiércol alimentado (kg/día)	594,29
Agua alimentada (L/día)	3565,71
Temperatura promedio local ambiente (ºC)	12±3
Tasa de producción de biogás (m^3biogas/m^3digestor*día)	0,061
Producción específica (m^3biogas/kg VS)	0,117
Tiempo de uso (años)	8

Tabla 7.16. Características de diseño del biodigestor de bajo coste. HRT: Tiempo de Retención Hidráulico; OLR: Tasa de Carga Orgánica

En la siguiente tabla (tabla 7.17) se observan los parámetros obtenidos del digestado:

Parámetros digestado	Valor
SV (g/kg)	1,4±0,2
ST (g/kg)	2,1±0,4
DQO (mg/L)	17000±12
AGV totales (mg/L)	343,71±0,0
pH	7,591±0,33
Potencial de Biometanización Residual (m^3CH_4/kg SV)	0,122
Coliformes fecales	$1,70^6$ UFC/g

Tabla 7.17. Parámetros digestado de los biodigestores de Colombia. SV: Sólidos Volátiles; ST: Sólidos Totales; DQO: Demanda Química de Oxígeno; AGV: Ácidos Grasos Volátiles

No se han obtenido los datos del contenido de macronutrientes, micronutrientes y químicos-metales.

7.2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CASO DE ESTUDIO 2

En las tablas siguientes se describe las tecnologías en función de su dimensionamiento, parámetros de diseño y materiales utilizados para su implementación:

Los parámetros de diseño de la alternativa (A1) Tanque de desgasificación, son:

Parámetro de diseño	**Tanque de desgasificación (A1)**
Longitud (m)	27,50
Diámetro (m)	3,00
Carga diaria (L/día)	4160
Volumen total (m^3)	194,13
Volumen útil (m^3)	145,60
TRH (días)	35
Materiales utilizados	Polietileno para el tanque
	Piedras

Tabla 7.18. Parámetros de diseño del Tanque de desgasificación (A1)

Los parámetros de diseño de la alternativa (A2) Filtro de arena, son:

Parámetro de diseño	**Filtro de arena (A2)**
Profundidad filtro (m)	1,20
Profundidad soporte grava (m)	0,30
Radio (m)	3,70
Carga diaria (L/día)	1386
Volumen total (m^3)	64,71
Volumen útil (m^3)	48,53
TRH (días)	35
Velocidad de filtración (m/h)	0,15
Materiales utilizados	Barril de plástico
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas

Tabla 7.19. Parámetros de diseño del Filtro de arena (A2)

Para optimizar el rendimiento del filtro, se ha considerado implementar 3 filtros cilíndricos, de modo que el volumen total en cada uno de ellos se reduce. Así pues, el volumen total de los 3 filtros es de 194,14 m^3 , el volumen útil es de 145,60 m^3 y la carga diaria es de 4160 L/día.

Los parámetros de diseño de la alternativa (A3) Vermicompostaje, son:

Parámetro de diseño	**Vermicompostaje (A3)**
Longitud (m)	4,50
Anchura (m)	1,00
Altura (m)	1,00
Carga diaria (L/día)	4160
Volumen total (m^3)	4,50
	Cajas de madera

Materiales utilizados	Lombrices
	Sustrato

Tabla 7.20. Parámetros de diseño del Vermicompostaje (A3)

Los parámetros de diseño de la alternativa (A4) Recirculación, son:

Parámetro de diseño	Recirculación (A4)
Longitud (m)	32,00
Diámetro (cm)	20,00
Carga diaria (L/día)	4160
Materiales utilizados	Tubería de polietileno
	Bomba

Tabla 7.21. Parámetros de diseño de Recirculación (A4)

Los parámetros de diseño de la alternativa (A5) Maduración aerobia, son:

Parámetro de diseño	Maduración aerobia (A5)
Longitud (m)	27,50
Diámetro (m)	3,00
Carga diaria (L/día)	4160
Volumen total (m^3)	194,13
Volumen útil (m^3)	145,60
TRH (días)	35
Materiales utilizados	Polietileno para el tanque
	Piedras

Tabla 7.22. Parámetros de diseño del Maduración Aerobia (A5)

Para la alternativa A6, los parámetros de diseño son iguales a las alternativas A1+A2. Así mismo, para la alternativa A7, los parámetros de diseño son iguales a las alternativas A1+A3, y finalmente, para la alternativa A8, los parámetros de diseño son iguales a las alternativas A1+A5.

7.2.2. INTRODUCCIÓN DE DATOS

Para la introducción de datos, al igual que el caso de estudio 1, se han especificado los valores de cada subcriterio para cada alternativa estudiada, teniendo en cuenta la clasificación de cada criterio según si el valor óptimo es el máximo posible (+) o el mínimo posible (-).

Así, en la tabla 7.23 se describen los datos de entrada de los Criterios Técnicos:

Subcriterios		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Unidades	+/-
CT1	Contenidos químicos-metales	0	0	0	0	0	0	0	0	mg Zn/kg ST	-
CT2	Contenidos químicos-metales	$3,57^5$	$1,79^5$	$3,57^4$	$3,57^6$	$1,79^5$	$1,79^5$	$3,57^4$	$1,79^5$	UFC/g	-
CT3	Contenido de materia seca	0,81	0,12	50,00	1,21	30,00	0,12	1,21	30,00	% MS	+
CT4	Contenido de nutrientes	0	0	0	0	0	0	0	0	mg NKT/kg	+

CT5	pH	7	7	7	7	7	7	7	7	-	
CT6	Conductividad eléctrica	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	ds/m	
CT7	Producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado)	0,122	0	0	0,110	0	0,122	0,122	0,122	m^3 CH_4/kg SV	+
CT8	Necesidad de personal cualificado	3	4	3	3	3	3	4	3	Cualitativo 1 a 5	-
CT9	Facilidad de construcción e implementación	3	2	3	3	3	2	3	3	Cualitativo 1 a 5	+
CT10	Facilidad de mantenimiento	4	3	3	4	4	2	2	3	Cualitativo 1 a 5	+
CT11	Necesidad de superficie	90	95	4,5	32	90	185	94,5	180	m^2	-
CT12	Vida útil	5	9	5	40	5	7	5	5	años	+

Tabla 7.23. Datos de entrada para la aplicación de un caso real para los Criterios Técnicos

Se especifica la obtención de los datos de cada subcriterio, valorados de manera cuantitativa o cualitativa, 1 (muy bajo), 2 (bajo), 3 (medio), 4 (alto) y 5 (muy alto):

CT1 - Contenidos químicos-metales: se ha cuantificado de manera cuantitativa el mg/kg la cantidad de Zinc (Zn) presente en el digestado después de ser tratado con las alternativas de postratamiento.

En el análisis nutricional, no se han obtenido datos de los químicos-metales, por lo que no es posible evaluar este criterio.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que si el valor de Zn en el digestado supera el valor máximo permisible de la categoría B de biosólidos (2800 mg/kg de Zn), según el Decreto 1287,se debe aplicar necesariamente una tecnología de postratamiento.

De este modo, sin los datos del contenido de Zn, en este caso de estudio este criterio no discrimina entre alternativas.

CT2 - Contenidos microbiológicos: se ha cuantificado en UFC/kg el contenido microbiológico que presenta el digestado al ser tratado con las alternativas de postratamiento.

Los datos microbiológicos de Coliformes fecales en el análisis de las condiciones higiénicas del digestado, es de $3{,}57^6$ UFC/g. Este valor es superior al valor máximo permisible de la categoría B de biosólidos (2000 UFC/g de biosólido), según el Decreto 1287. Por lo tanto, no estaría permitido aplicar el digestado directamente al suelo.

Con la aplicación de las tecnologías de postratamiento, la cantidad de Coliformes fecales disminuye:

- La alternativa A1, la eficiencia de eliminación de Coliformes fecales se ha estimado en el 90% (Varnedo, 2011). Por lo tanto, el contenido de Coliformes fecales es de $3{,}57^5$ UFC/g.

- La alternativa A2 y A5 se ha estimado en una eficiencia de eliminación de Coliformes fecales del 95% (Torres et al., 2013; Tzatchkov et al., 2007). Por lo tanto, el contenido de Coliformes fecales es de $1,79^5$ UFC/g y $1,79^5$UFC/g respectivamente.
- La alternativa A3, posee una eficiencia de eliminación de microorganismos patógenos del 99-100% (Droppelmann, Gaete and Miranda, 2009). Por lo tanto, el contenido de Coliformes fecales es de $3,57^4$ UFC/g.
- La alternativa A4, la capacidad de remoción de microorganismos patógenos es igual al contenido de microorganismos patógenos que sale del digestado. Por lo tanto, el contenido de Coliformes fecales es de $3,57^6$ UFC/g.
- La alternativa A6, A7 y A8, poseen una eficiencia de eliminación de microorganismos patógenos del 95%, 99% y del 95% respectivamente. Por lo tanto, el contenido de Coliformes fecales es de $1,79^5$ UFC/g, $3,57^4$ UFC/g y $1,79^5$ UFC/g respectivamente.

CT3 - Contenido de materia seca: se ha cuantificado en % de materia seca (% MS) presente en el digestado después de ser tratado con las tecnologías de postratamiento. Según el análisis fisicoquímico del digestado, el contenido de Sólidos totales es de 8,05 g/kg.

Según las fórmulas especificadas en el caso de estudio 1, el contenido de materia seca de cada alternativa es:

- La alternativa A1, el contenido de materia seca es de 0,81%.
- La alternativa A2, el contenido de materia seca es de 0,12%.
- La alternativa A3, el contenido de materia seca es de 50%.
- La alternativa A4, el contenido de materia seca es de 1,21%.
- La alternativa A5, el contenido de materia seca es de 30%.
- Las alternativas A6, A7 y A8, tiene un contenido en materia seca de 0,12%, 1,21% y 30%.

CT4 - Contenido de nutrientes: se ha valorado de manera cuantitativa el mg/kg la cantidad de Nitrógeno total (NKT) presente en el digestado después de ser tratado con las alternativas de postratamiento.

Se ha escogido el valor del Nitrógeno total (NKT) como el macronutriente más representativo para el contenido de nutrientes. Sin embargo, en el análisis nutricional no se han obtenido valores del contenido de NKT, por lo que no es posible evaluar este criterio y, por lo tanto, en este caso de estudio este criterio no discrimina entre alternativas.

CT5 - pH: se ha valorado de manera cuantitativa el valor de pH del digestado después de ser tratado con las alternativas de postratamiento. Se considera un pH de 7 para todas las alternativas.

CT6 - Conductividad eléctrica: se ha valorado de manera cuantitativa el valor de la conductividad eléctrica en dS/m, que se mide una vez el digestado ha sido tratado por las alternativas de postratamiento. Este valor es igual al inicial de 0,02 dS/m.

CT7 - Producción biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado): se valora de manera cuantitativa en m^3 CH_4/kg SV el potencial de biometanización residual del digestado después del postratamiento.

El potencial de biometanización residual del digestado es de 0,122 m^3 CH_4/kg SV, según los valores obtenido de la valorización energética del digestado.

Se debe considerar que la temperatura promedio local es relativamente baja (12 ºC), por lo que la producción de biogás residual se podría ver afectada por este parámetro, disminuyendo así su potencial de recuperación de biogás.

- La alternativa A1, se ha considerado que gran parte del biogás residual se produce, por lo que se estima un potencial de biometanización residual del 0,122 m³ CH_4/kg SV.
- Las alternativas A2, A3 y A5, no disponen de un sistema de almacenaje del biogás, por lo que la producción de biogás residual es 0 m³ CH_4/kg SV.
- La alternativa A4, cuando el digestado se almacena en un tanque y luego es recirculado a través de una tubería, parte del biogás residual es retornado al inicio del biodigestor. Se ha considerado que un 10% se pierda en el momento de almacenaje del digestado en un tanque abierto. Por lo tanto la producción de biogás residual es 0,110 m³ CH_4/kg SV.
- Las alternativas A6, A7 y A8, se estima que todo el biogás se produce y, por lo tanto, el potencial de biometanización residual de 0,122 m³ CH_4/kg SV.

CT 8 - Necesidad de personal cualificado: se ha valorado de manera cualitativa la capacitación que se requiere para el manejo de las alternativas. Se prioriza la tecnología que requiera menos personal cualificado para su construcción y manejo.

Se otorga (1) a muy baja complejidad y (5) a muy alta complejidad.

- La alternativa A1, A4 y A5, son tecnologías que tienen una complejidad 3 (media), de manera que el personal no necesariamente debe estar muy bien cualificado para su manejo, pero si es necesario más operarios para su construcción.
- La alternativa A2 y A3, son tecnologías que tienen una complejidad alta (4) y media (3) respectivamente, ya que la construcción y el manejo de las tecnologías requiere de mayor atención y conocimiento para su correcto funcionamiento.
- Las alternativas A6, A7 y A8, son tecnologías que tienen una media (3) y alta (4) complejidad, porque requieren de una construcción más compleja al ser alternativas compuestas por dos tecnologías y su manejo requiere de conocimientos previos.

CT9 - Facilidad de construcción e implementación: se ha valorado de manera cualitativa el grado de facilidad de su construcción e implementación. Teniendo en cuenta la disponibilidad local de los materiales y el personal especializado para la contracción. Se prioriza la tecnología que tenga una menor dificultad para su construcción e implementación.

Se otorga (1) a muy baja facilidad de construcción e implementación y (5) a muy alta facilidad de construcción e implementación.

- La alternativa A1 y A3, y A5, se ha considerado que tienen una media (3) facilidad de construcción e implementación, puesto que aunque son tecnologías de construcción sencilla y los materiales pueden encontrarse localmente (Santos et al., 2013).
- La alternativa A2, se considera que tiene una baja (2) facilidad de construcción e implementación ya que los materiales para su construcción deben ser comprados.
- La alternativa A4, se considera que tiene una media (3) dificultad de construcción e implementación. Puesto que requiere comprar los materiales específicos para su funcionamiento.

- Las alternativas A6, A7 y A8, son tecnologías con baja (2) y media (3) facilidad de construcción e implementación, puesto que son alternativas compuestas por dos tecnologías y su construcción se hace más compleja, al igual que la obtención local y de compra de los materiales.

CT10 - Facilidad de mantenimiento: se ha valorado de manera cualitativa el grado de facilidad de su mantenimiento y el personal necesario para su manejo. Se prioriza la tecnología que tenga requiera menos horas al día para su gestión y mantenimiento.

- La alternativa A1 y A5, el grado de facilidad de mantenimiento es alto (4), puesto que no requieren de una gran gestión y mantenimiento (Tzatchkov et al., 2007).
- La alternativa A2, tiene un grado de facilidad de mantenimiento medio (3) (Blancio-Ordoñez et al., 2011; Sumarno, 2009).
- La alternativa A3, tiene un grado de facilidad de mantenimiento medio (3), ya que se requiere de un aporte de restos diario para mantener las condiciones adecuadas para las lombrices (Vermican, 2019).
- La alternativa A4, tiene un grado de facilidad de mantenimiento alto (4), puesto que la recirculación se realiza mediante una tubería que conecta el efluente del biodigestor con la entrada del mismo.
- Las alternativas A6, A7 y A8, presentan un grado de facilidad de mantenimiento bajo (2) y medio (3), ya que son alternativas compuestas por dos tecnologías y en consecuencia el mantenimiento es mayor.

CT11 - Necesidad de superficie: se ha valorado de manera cuantitativa en m² la superficie requerida por cada alternativa.

- Para las alternativas A1 y A5, se usa la misma superficie utilizada para la construcción de un biodigestor de polietileno. El volumen del biodigestor es de 101,25 m³, la anchura del plástico es de 2,00 m, con una sección de 1,27 m². Las bolsas utilizadas para la construcción del tanque de desgasificación y la maduración aerobia, están colocados en rasas semicavadas. Así pues, la superficie requerida para su construcción es de 90 m².
- Para la alternativa A2, considerando que se instalan 3 filtros con un volumen total de 194,14 m³, el barril de plástico debe tener unas dimensiones de radio 3,70 m y profundidad 1,50 m. Así pues, los 3 barriles ocupan una superficie de 95 m².
- Para la alternativa A3, considerando que los litros de efluente del biodigestor son 4160 L/día, el vermicompostador debe tener unas dimensiones de 4,50 m de largo por 1,00 m de ancho. Tiene una capacidad de 4,5 m³. Por lo tanto, la superficie requerida para su construcción es de 4,5 m².
- Para la alternativa A4., se considera que la tubería tiene una longitud de 32 m para conectar la salida del biodigestor con la entrada de este. Por lo tanto, la superficie requerida será de 32 m² a lo largo del biodigestor.
- Para las alternativas A6, A7 y A8, la superficie requerida será la suma de las dos alternativas compuestas.

CT12 - Vida útil: se ha valorado de manera cuantitativa en años la vida útil de cada alternativa, teniendo en cuenta la durabilidad de los materiales para la construcción de las tecnologías.

- Para la alternativa A1 y A5, se ha considerado una vida útil de 5 años para la construcción del tanque de desgasificación de polietileno. (Garfí *et al.*, 2016).
- Para la alternativa A2, se ha considerado una vida útil de 8-10 años, para la arena y el tanque de plástico. (Collins *et al.*, 2016).
- Para la alternativa A3, se ha considerado una vida útil de 5 años para las cajas de madera.
- Para la alternativa A4, se ha considerado una vida útil de más de 40 años, puesto que es el PVC utilizado para la tubería, es un material inmune a la corrosión y no se oxida o reacciona químicamente con el líquido que transporta (Brusi et al., 2017).
- Para la alternativa A6, se ha considerado la media de los 5 años de vida del tanque de desgasificación de polietileno entre los 8-10 años de vida del tanque de plástico del filtro de arena.
- Para las alternativas A7 y A8 , se ha considerado una vida útil de 5 años, puesto que las alternativas A1, A3 y A5 tienen esa durabilidad.

En la siguiente tabla (tabla 7.24) se describen los datos de entrada de los Criterios Ambientales:

Subcriterios		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Unidades	+/-
CA1	Generación de residuos	0	0	0	0	0	0	0	0	m^3	-
CA2	Emisiones al aire (partículas)	0	0	0	0	0	0	0	0	Cualitativo 1 a 5	-
CA3	Emisiones al suelo	0	0	0	0	0	0	0	0	mg/kg	-
CA4	Emisiones al agua	0	0	0	0	0	0	0	0	mg/L	-
CA5	Emisiones de olores	0	3	2	0	3	2	1	2	Cualitativo 1 a 5	-
CA6	Emisiones de gases de efecto invernadero	0	0	4	2	4	0	3	3	Cualitativo 1 a 5	-
CA7	Generación de aerosoles (patógenos)	0	0	0	0	0	0	0	0	Cualitativo 1 a 5	-
CA8	Sostenibilidad de los materiales	2	2	3	3	2	2	3	2	Cualitativo 1 a 5	+
CA9	Consumo de agua	3565,71	3565,71	3565,71	1782,86	3565,71	3565,71	3565,71	3565,71	L/día	-
CA10	Consumo de energía	0	0	0	0	0	0	0	0	kW/h	-

Tabla 7.24. Datos de entrada para la aplicación de un caso real para los Criterios Ambientales

CA1 - Generación de residuos: se ha valorado de manera cuantitativa en m^3 la cantidad de residuos generados una vez aplicada la tecnología.

Al ser tecnologías de bajo coste pensadas para el aprovechamiento de un residuo orgánico, se ha considerado que no genera residuos o que los residuos que generan en cantidades mínimas pueden ser reutilizados.

CA2 - Emisiones al aire (partículas): se ha valorado de manera cuantitativa la cantidad de emisiones de partículas.

Se ha considerado que no hay emisiones de material particulado en el uso de las tecnologías de postratamiento. Esto se debe a las alternativas A1, A2, A3, A4, A6 y A7 son tecnologías que permanecen selladas. Así mismo, la alternativa A5 y A8, son alternativas que no se aplica agitación y por lo tanto, aunque están abiertas al aire libre, no generan partículas.

CA3 - Emisiones al suelo: se ha cuantificado de manera cuantitativa en mg de compuesto/kg de suelo, la contaminación del suelo por filtración.

Se ha considerado que todas las alternativas son tecnologías impermeabilizadas, por lo que las emisiones al suelo son 0 mg/kg.

CA4 - Emisiones al agua: se ha cuantificado de manera cuantitativa en mg/L de agua, la contaminación al agua que pueden generar las tecnologías.

Cada tecnología dispone de un sistema impermeable que no permite la filtración de sustancias nocivas dañinas para las aguas superficiales y subterráneas. Por lo tanto, las emisiones al agua son de 0 mg/L

CA5 - Emisiones de olores: se ha valorado de manera cualitativa las emisiones por olores que pueden generar las tecnologías. Se prioriza la tecnología que genere menores cantidad de gases contaminantes odoríferos.

Se otorga (1) a muy baja generación de emisiones de olores y (5) a muy alta generación de emisiones de olores.

- La tecnología A1, no genera emisiones de olores (0), ya que dispone de un sistema cerrado donde el digestado no está en contacto con la atmosfera y no puede emitir olores.
- La tecnología A2, tiene una cierta capacidad de remoción de olores (Maldonado, 2004), por lo que se ha estimado que la generación de olores es media (3).
- La tecnología A3, tiene cierto riesgo de generar olores si el material que se composta desprende emisiones de olores. Por lo tanto, se ha considerado una generación de olores media (2) (Vermican, 2019; Santos et al., 2013).
- La tecnología A4 es una tecnología que dispone de un sistema cerrado por lo que no genera olores (0).
- La tecnología A5, pude generar emisiones de sulfuro de hidrógeno debido a una sobre carga orgánica, por lo que se ha considerado que la generación de emisiones de olores es media (3) (Tzatchkov, 2007).
- La tecnología A6, es una tecnología que dispone del tanque de desgasificación y el filtro de arena para retener los gases contaminantes odoríferos. Estas dos tecnologías captan entera y parcialmente estas emisiones de olores. Por lo tanto, se ha considerado que la generación de emisiones de olores es baja (2).

- Las tecnologías A7 y A8, son alternativas compuestas por dos tecnologías que retienen los gases contaminantes odoríferos entera y parcialmente. De este modo, se ha considerado que la generación de olores es muy baja (1) y baja (2), respectivamente.

CA6 - Emisiones de gases de efecto invernadero: se ha valorado de manera cualitativa las emisiones de gases de efecto invernadero emitidas por las tecnologías. Se ha considerado solo las emisiones de CH_4 y CO_2.

Se otorga (1) a muy bajas emisiones de gases de efecto invernadero y (5) a muy altas emisiones de gases de efecto invernadero

- Para la alternativa A1, A2 y A6, se ha considerado que las emisiones de CH_4 y CO_2, son nulas, puesto que son tecnologías sellas.
- Para la alternativa A3, A5, A7 y A8, se ha considerado que las emisiones de CH_4 y CO_2 pueden ser altas (4) para las alternativas A3 y A5, y medias (3) para las alternativas A7 y A8, debido a que no se recupera el CH_4 y por lo tanto se emite directamente a la atmosfera.
- La alternativa A4, el tiempo que el digestado permanece en el tanque, puede generar ciertas emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello se ha considerado que las emisiones de gases de efecto invernadero son bajas (2).

CA7 - Generación de aerosoles (patógenos): se ha considerado de manera cualitativa la generación de aerosoles patógenos que pueden generar las tecnologías.

Se ha considerado que no hay generación de aerosoles (patógenos) puesto que las alternativas A1, A2, A3, A4, A6 y A7 son tecnologías que permanecen selladas. Así mismo, la alternativa A5 y A8, son alternativas que no se aplica agitación y por lo tanto, aunque están abiertas al aire libre, no generan aerosoles que puedan contener patógenos.

CA8 - Sostenibilidad de los materiales: se ha valorado de manera cualitativa los materiales empleados para la construcción de las tecnologías, así como sus cantidades, su disponibilidad local (si los materiales pueden ser conseguidos localmente o deben ser comprados) y la vida útil de cada tecnología. Se prioriza la tecnología que utilice materiales sostenibles.

Se otorga (1) a muy baja sostenibilidad de materiales y (5) a muy alta sostenibilidad de materiales.

En la tabla 7.25 se ha valorado de manera cualitativa cada alternativa en función de la cantidad, la disponibilidad y la vida útil de los materiales empleados para cada tecnología:

Alternativa	Material	Cantidad de material	Disponibilidad	Vida útil (años)	Valoración cualitativa
A1	Polietileno para el tanque	100 m²	Compra	5	2
	Piedras	200 bolsas	Local		
	Barril de plástico	90 m²	Compra		

A2	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas	100 kg	Compra	8-10	2
A3	Cajas de madera	4,50 m²	Local	5	3
	Lombrices	2 kg	Compra		
	Sustrato	-	Local		
A4	Tubo PVC	1 tubería	Compra	40	3
	Bomba	1 bomba	Compra		
A5	Bolsa de polietileno	100 m²	Compra	5	2
	Piedras	90 bolsas	Local		
A6	Polietileno para el tanque	100 m²	Compra	5	2
	Piedras	200 bolsas	Local		
	Barril de plástico	90 m²	Compra		
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas	100 kg	Compra		
A7	Polietileno para el tanque	100 m²	Compra	5	3
	Piedras	200 bolsas	Local		
	Cajas de madera	4,50 m²	Local		
	Lombrices	2 kg	Compra		
	Sustrato	-	Compra		
A8	Polietileno para el tanque	100 m²	Compra	5	2
	Piedras	200 bolsas	Local		
	Bolsa de polietileno	100 m²	Compra		

Tabla 7.25. Sostenibilidad de los materiales empleados en cada alternativa

CA9 - Consumo de agua: se ha valorado de manera cuantitativa en L/día de agua requerida para el funcionamiento de cada tecnología. Al ser alternativas alimentadas con digestado líquido, el consumo de agua es nulo.

- Para las alternativas A1, A2, A3, A5, A6, A7 y A8, se ha considerado que los litros de agua requeridos para el funcionamiento de las tecnologías, es la cantidad de agua utilizada para alimentar el sistema, es decir, el agua requerida para alimentar el biodigestor y, posteriormente obtener el digestado para ser tratado por las tecnologías de postratamiento. De este modo, los litros de agua requeridos para el funcionamiento de las tecnologías son de 3565,71 L/día.
- Para la alternativa A4, se ha considerado que los litros de agua requeridos para el funcionamiento de la tecnología son de 1782,86 L/día, puesto que se considera una recirculación del digestado del 50%.

CA10 - Consumo de energía: se ha valorado de manera cuantitativa en kW/h de energía requerida para el funcionamiento de cada tecnología.

Al ser alternativas muy sencillas no requieren de bombas ni otros dispositivos para su implementación y posterior funcionamiento. Por ello se ha considerado que el consumo de energía es de 0 kW/h.

En la siguiente tabla se describen los datos de entrada de los Criterios Económicos:

Subcriterios		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	Unidades	+/-
CE1	Inversión inicial (Capacidad de pago)	4000	740	11	32000	350	4740	4011	4350	$	-
CE2	Coste de mantenimiento	16000	1650,20	73,37	16000	1400	18969	16044	17400	$/20 años	-
CE3	Generación de ingresos	2	5	4	3	5	5	4	5	Cualitativo 1 a 5	+
CE4	Capacidad de ahorro	5	4	4	3	4	5	5	5	Cualitativo 1 a 5	+

Tabla 7.26. Datos de entrada para la aplicación de un caso real para los Criterios Económicos

CE1 - Inversión inicial (capacidad de pago): se ha valorado de manera cuantitativa en $ la inversión realizada para la instalación de las alterativas.

Al no disponer de los datos de inversión inicial de cada tecnología, se estima el coste de inversión inicial de los materiales y sus cantidades para la implementación de las tecnologías (Acosta-Bedoya, 2013; Garfí *et al.*, 2019). En la tabla 7.27 se muestran los costes de inversión inicial:

Alternativa	**Material**	**Cantidad**	**Coste material ($)**	**Inversión inicial ($)**
A1	Polietileno para el tanque	100 m²	4000	4000
	Piedras	200 bolsas	0	
A2	Barril de plástico	90 m²	240	740
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas	100 kg	500	
A3	Cajas de madera	4,50 m²	0	11
	Lombrices	2 kg	11	
	Sustrato	-	0	
A4	Tubería	1 tubería	12000	32000
	Bomba	1 bomba	20000	
A5	Bolsa de polietileno	100 m²	350	350
	Piedras	90 bolsas	0	
A6	Polietileno para el tanque	100 m²	4000	4740
	Piedras	200 bolsas	0	
	Barril de plástico	90 m²	240	
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas	100 kg	500	
	Polietileno para el tanque	100 m²	4000	4011

A7	Piedras	200 bolsas	0	
	Cajas de madera	4,50 m²	0	
	Lombrices	2 kg	11	
	Sustrato	-	0	
A8	Polietileno para el tanque	100 m²	4000	4350
	Piedras	200 bolsas	0	
	Bolsa de polietileno	100 m²	350	
	Piedras	90 bolsas	0	

Tabla 7.27. Inversión inicial (capacidad de pago) de cada alternativa

En la tabla 7.27 , los materiales cuyo valor es 0 $, se debe a que su obtención es local y, por lo tanto, pueden ser adquiridos dentro de la propia comunidad.

CE2 - Coste de mantenimiento: se ha valorado de manera cuantitativa en $ el coste de mantenimiento de cada alternativa.

En la tabla 7.28 se observa el coste de mantenimiento en $ de cada alternativa:

Alternativa	Material	Vida útil (años)	Gastos por 20 años	Inversión inicial ($)	Coste de mantenimiento ($)
A1	Polietileno para el tanque	5	4	4000	16000
	Piedras				
A2	Barril de plástico	9	2,23	740	1650,20
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas				
A3	Cajas de madera	3	6,67	11	73,37
	Lombrices				
	Sustrato				
A4	Tubería	40	0,5	32000	16000
	Bomba				
A5	Bolsa de polietileno	5	4	350	1400
	Piedras				
A6	Polietileno para el tanque	7	4	4740	18969
	Piedras				
	Barril de plástico				
	Arena gruesa, grava y piedras pequeñas				
A7	Polietileno para el tanque	5	4	4011	16044
	Piedras				
	Cajas de madera				
	Lombrices				
	Sustrato				
A8	Polietileno para el tanque	5	4	4350	17400
	Piedras				
	Bolsa de polietileno				

Tabla 7.28. Coste de mantenimiento de cada alternativa

CE3 - Generación de ingresos: se ha valorado de manera cualitativa la generación de ingresos que puede generar cada alternativa. Se prioriza la tecnología que pueda dar un beneficio económico mayor.

Se otorga (1) a muy baja generación de ingresos y (5) a muy alta generación de ingresos.

- La alternativa A1, se ha considerado que tiene una generación de ingresos baja (2), ya que el biogás residual producido no se vende.
- La alternativa A2, A5, A6 y A8, se ha considerado que tiene una generación de ingresos muy alta (5), ya que el digestado que sale de los postratamientos puede ser vendido para ser aplicado como biofertilizante en el campo.
- La alternativa A3 y A7, se ha considerado que tiene una generación de ingresos alta (4), puesto que el humus generado y el lixiviado que sirve como abono líquido, pueden ser vendidos.
- La alternativa A4, se ha considerado que tiene una generación de ingresos media (3).

CE4 - Capacidad de ahorro: se ha valorado de manera cualitativa la capacidad de ahorro que puede tener cada alternativa. Se prioriza la tecnología que evite un gasto.

Se otorga (1) a muy baja capacidad de ahorro y (5) a muy alta capacidad de ahorro.

- Las alternativas A1, A6, A7 y A8, generan una cantidad de biogás residual que puede ser utilizado como combustible. Con el biogás producido en el biodigestor, una familia se ahorra hasta el 80% del combustible utilizado para cocinar (Garfí *et al.*, 2019). Así pues, con el biogás residual obtenido de las alternativas, el ahorro de combustible es mayor al 80%. Por lo tanto, se ha considerado que la capacidad de ahorro es muy alta (5).
- La alternativa A2 y A3, se ha considerado que la capacidad de ahorro es alta (4), ya que se pueden utilizar los lixiviados del filtro de arena y el vermicompostador como fertilizante orgánico.
- La alternativa A4, se ha considerado que la capacidad de ahorro es media (3), ya que la recirculación del 50% del digestado, genera la mitad de digestado útil para ser aplicado como fertilizante orgánico y, por lo tanto, sustituye en parte el uso de fertilizantes convencionales.
- La alternativa A5, se ha considerado que tiene una capacidad de ahorro alta (4), ya que con la aplicación del digestado pretratado, se obtiene un fertilizante de mayor calidad y por lo tanto se puede ahorrar hasta el 80% de fertilizantes convencionales (Garfí *et al.*, 2019).

En la siguiente tabla se describen los datos de entrada de los Criterios Sociales:

Subcriterios		**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**	**A7**	**A8**	**Unidades**	**+/-**
CS1	Mejoramiento de las condiciones de vida	5	5	5	5	5	5	5	5	Cualitativo 1 a 5	+
CS2	Grado de aceptación	4	2	2	4	3	2	2	3	Cualitativo 1 a 5	+

CS3	Equidad de género	5	5	5	5	5	5	5	5	Cualitativo 1 a 5	+
CS4	Beneficios en la salud	5	4	5	5	4	4	5	4	Cualitativo 1 a 5	+

Tabla 2.29. Datos de entrada para la aplicación de un caso real para los criterios del aspecto Social

CS1 - Mejoramiento de las condiciones de vida: se ha valorado de manera cualitativa el grado de mejora en las condiciones de vida de la comunidad o familia.

Se otorga (1) a muy bajo mejoramiento de las condiciones de vida y (5) a muy alto mejoramiento de las condiciones de vida.

Se ha considerado que las puntuaciones de todas las alternativas son de muy alto mejoramiento de las condiciones de vida (5). Así pues, este criterio no discrimina entre alternativas.

CS2 - Grado de aceptación: se ha valorado de manera cualitativa el grado de aceptación de las tecnologías en su contexto actual y cultural.

Se otorga (1) a muy bajo grado de aceptación y (5) a muy alto grado de aceptación.

- Para las tecnologías A1 y A4, se ha considerado que el grado de aceptación es alto (4), por su mayor implementación en zonas rurales y los beneficios energéticos y fertilizantes que proporciona y su facilidad de manejo y mantenimiento.
- Para las tecnologías A5 y A8, se ha considerado un grado de aceptación medio (3), puesto que no hay beneficios energéticos ya que no se recupera el biogás residual, pero si beneficios de obtención de fertilizantes orgánicos.
- Para las tecnologías A2, A3, A6 y A7, se ha considerado un grado de aceptación bajo (2), al ser tecnologías actualmente poco utilizadas, si requieren de atención diaria para su funcionamiento y mantenimiento. Por otra parte, no generan beneficios energéticos, pero si beneficios de obtención de fertilizantes orgánicos.

CS3 - Equidad de género: se ha valorado de manera cualitativa el grado de sesgo de género y que respete/mejore las condiciones de las mujeres.

Se otorga (1) a muy baja equidad de género y (5) a muy alta equidad de género.

Todas las alternativas mejoran las condiciones de las mujeres en la implementación y uso de las tecnologías, así como la equidad entre géneros. Por ello, se ha considerado que todas las alternativas son de muy alta equidad de género (5). Así pues, este criterio no discrimina entre alternativas.

CS4 - Beneficios en la salud: se ha valorado de manera cualitativa el grado de beneficios en la salud humana y menor afectación debido al manejo y/o exposición constante al uso del digestado de cada tecnología.

- Para las alternativas A1, A3, A4 y A7 su afectación a la salud humana en cuanto a trabajo físico, contacto directo con el digestado, inhalación de olores y partículas, es nulo. Así pues, se ha considerado que el grado de beneficio en la salud es muy alto (5).

- Para las alternativas A2, A5, A6 y A8, su ejecución requiere de cierto trabajo físico y estar en contacto directo con el digestado. Por ello, se ha considerado que el grado de beneficio en la salud es alto (4).

7.2.3. OBTENCIÓN DE RESULTADOS

En la tabla 7.30 se muestran los criterios identificados para la toma de decisiones, sus pesos y sus valores ideales y no ideales, según si el criterio tiene el valor óptimo en el máximo posible (+) o el mínimo posible (-).

Para facilitar la comprensión se organizan según los aspectos, criterios y subcriterios elegidos anteriormente:

Aspecto	Criterio	Subcriterio		Peso	+/-	Valor ideal	Valor no ideal
Técnico	Características digestato (Cantidad y calidad)	CT1	Contenidos químicos-metales	0,031	-	0,000	0,000
		CT2	Contenidos microbiológicos	0,037	-	35700,000	3570000,000
		CT3	Contenido de materia seca	0,028	+	50,000	0,120
		CT4	Contenido de nutrientes	0,038	+	0,000	0,000
		CT5	pH	0,033		7,000	7,000
		CT6	Conductividad eléctrica	0,028		0,030	0,030
		CT7	Producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado)	0,035	+	0,122	0,000
	Gestión	CT8	Necesidad de personal cualificado	0,029	-	3,000	4,000
		CT9	Facilidad de construcción e implementación	0,034	+	3,000	2,000
		CT10	Facilidad de mantenimiento	0,039	+	4,000	2,000
	Disponibilidad de superficie	CT11	Necesidad de superficie	0,027	-	4,500	185,000

	Vida útil	CT12	Vida útil	0,032	+	40,000	5,000
Ambiental	Contaminación	CA1	Generación de residuos	0,025	-	0,000	0,000
		CA2	Emisiones al aire (partículas)	0,027	-	0,000	0,000
		CA3	Emisiones al suelo	0,030	-	0,000	0,000
		CA4	Emisiones al agua	0,035	-	0,000	0,000
		CA5	Emisiones de olores	0,032	-	0,000	3,000
		CA6	Emisiones de gases de efecto invernadero	0,032	-	0,000	4,000
		CA7	Generación de aerosoles (patógenos)	0,037	-	0,000	0,000
	Consumo de recursos	CA8	Sostenibilidad de los materiales	0,033	+	3,000	2,000
		CA9	Consumo de agua	0,037	-	1782,860	3565,710
		CA10	Consumo de energía	0,031	-	0,000	0,000
Económico	Coste	CE1	Inversión inicial (Capacidad de pago)	0,038	-	11,000	32000,000
		CE2	Coste de mantenimiento	0,033	-	73,370	18969,000
	Beneficios	CE3	Generación de ingresos	0,034	+	5,000	2,000
		CE4	Capacidad de ahorro	0,035	+	5,000	3,000
Social	Condiciones de vida	CS1	Mejoramiento de las condiciones de vida	0,039	+	5,000	5,000
	Aceptación de la tecnología	CS2	Grado de aceptación	0,040	+	4,000	2,000
	Género	CS3	Equidad de género	0,035	+	5,000	5,000
	Salud	CS4	Beneficios en la salud	0,036	+	5,000	4,000

Tabla 7.30. Pesos y valores ideales y no ideales de los criterios seleccionados

Los criterios más importantes en el caso de estudio 2, son los mismos criterios con mayor importancia que el caso de estudio 1.

Por lo tanto, los criterios más importantes están relacionados con los criterios Sociales: mejoramiento de las condiciones de vida (CS1) con peso de 0,039; aceptación de la tecnología (CS2) con peso de 0,040; criterio equidad de género (CS3) con peso de 0,035; beneficios en la salud (CS4) con peso de 0,036. Todos ellos tienen puntuaciones por encima de 0,035, por lo que se consideran de alta influencia a la hora de escoger una alternativa de postratamiento.

Así mismo, se pueden encontrar criterios importantes relacionados con los criterios Técnicos, incluyendo: contenido microbiológico (CT2) con peso de 0,037; contenido de nutrientes (CT4) con peso 0,038; producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado) (CT7) con peso de 0,035; (CT10) con peso de 0,039.

Por último, algunos de los Criterios Ambientales y Económicos más importantes son: consumo de agua (CA9) con peso de 0,037; inversión inicial (CE1) con peso de 0,038.

Cabe destacar que, al igual que el caso de estudio 1, cuando el valor ideal es el valor mínimo de cada criterio en función de las alternativas, significa que se ha dado el valor óptimo al mínimo posible (-). Así mismo, cuando el valor ideal se ha dado al valor máximo de cada criterio en función de las alternativas, significa que se ha dado el valor óptimo al máximo posible (+).

En la tabla 7.31 se muestran los resultados de todos los indicadores con las ponderaciones generales. En la parte final de la tabla se muestra el valor de L_1, $L\infty$ y la semisuma Lf final.

En la tabla 7.31 se han evaluado las distintas alternativas considerando los criterios y subcriterios definidos y ponderados:

Subcriterios		+/-	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
CT1	Contenidos químicos-metales	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CT2	Contenidos microbiológicos	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CT3	Contenido de materia seca	+	0,027	0,028	0,000	0,027	0,011	0,028	0,027	0,011
CT4	Contenido de nutrientes	+	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CT5	pH		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CT6	Conductividad eléctrica		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CT7	Producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado)	+	0,000	0,035	0,035	0,003	0,035	0,000	0,000	0,000
CT8	Necesidad de personal cualificado	-	0,000	0,029	0,000	0,000	0,000	0,000	0,029	0,000
CT9	Facilidad de construcción e implementación	+	0,000	0,034	0,000	0,000	0,000	0,034	0,000	0,000
CT10	Facilidad de mantenimiento	+	0,000	0,019	0,019	0,000	0,000	0,039	0,039	0,019
CT11	Necesidad de superficie	-	0,013	0,014	0,000	0,004	0,013	0,027	0,014	0,027
CT12	Vida útil	+	0,032	0,028	0,032	0,000	0,032	0,030	0,032	0,032
CA1	Generación de residuos	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CA2	Emisiones al aire (partículas)	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CA3	Emisiones al suelo	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CA4	Emisiones al agua	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CA5	Emisiones de olores	-	0,000	0,032	0,021	0,000	0,032	0,021	0,011	0,021
CA6	Emisiones de gases de efecto invernadero	-	0,000	0,000	0,032	0,016	0,032	0,000	0,024	0,024
CA7	Generación de aerosoles (patógenos)	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CA8	Sostenibilidad de los materiales	+	0,033	0,033	0,000	0,000	0,033	0,033	0,000	0,033
CA9	Consumo de agua	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CA10	Consumo de energía	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CE1	Inversión inicial (Capacidad de pago)	-	0,005	0,001	0,000	0,038	0,000	0,006	0,005	0,005
CE2	Coste de mantenimiento	-	0,028	0,003	0,000	0,028	0,002	0,033	0,028	0,030

CE3	Generación de ingresos	+	0,034	0,000	0,011	0,023	0,000	0,000	0,011	0,000
CE4	Capacidad de ahorro	+	0,000	0,018	0,018	0,035	0,018	0,000	0,000	0,000
CS1	Mejoramiento de las condiciones de vida	+	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CS2	Grado de aceptación	+	0,000	0,040	0,040	0,000	0,020	0,040	0,040	0,020
CS3	Equidad de género	+	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CS4	Beneficios en la salud	+	0,000	0,036	0,000	0,000	0,036	0,036	0,000	0,036
L_1			0,173	0,350	0,208	0,175	0,265	0,328	0,259	0,260
$L\infty$			0,034	0,040	0,040	0,038	0,036	0,040	0,040	0,036
Lf			**0,104**	**0,195**	**0,124**	**0,107**	**0,151**	**0,184**	**0,149**	**0,148**

Tabla 7.31. Evaluación de las alternativas: datos de entrada y distancias de L_1, $L\infty$ y Lf

En la tabla 7.32 se muestran los resultados obtenidos de cada criterio, así como el valor óptimo del subcriterio, siendo el máximo posible (+) o el mínimo posible (-).

Los resultados muestran que la alternativa con menor distancia Lf de la solución ideal es la alternativa A1 (0,104), seguido de la alternativa A4 (0,107) y las alternativas A3 (0,124) y A8 (0,148). Finalmente las alternativas que muestran una mayor distancia Lf de la solución ideal son las alternativas A7 (0,149), la alternativa A5 (0,151), la alternativa A6 (0,184) i finalmente la alternativa A2 (0,191).

La influencia de criterios tales como los contenidos microbiológicos (CT2), la producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado) (CT7), facilidad de construcción e implementación (CT9) y facilidad de mantenimiento (CT10), son criterios que influyen directamente en el resultado final.

También tienen repercusión los criterios ambientales y sociales tales como: sostenibilidad de los materiales (CA8) y la inversión inicial (capacidad de pago) (CE1) que, en este caso perjudica la alternativa A4 por no disponer de materiales locales para su construcción y por lo tanto tener que comprarlos a un precio muy elevado.

Por último, los criterios sociales son los de mayor influencia en la elección de la alternativa A1 como la alternativa con menor distancia a la solución ideal, ya que los criterios de mejoramiento de las condiciones de vida (CS1), grado de aceptación (CS2), equidad de género (CS3) y beneficios en la salud (CS4), reciben altos valores cualitativos de la alternativa A1.

En la tabla 7.33, se han evaluado las distintas alternativas considerando los criterios y subcriterios definidos y ponderados, en función del perfil de los participantes:

	Alternativas							
Perfil	**A1**	**A2**	**A3**	**A4**	**A5**	**A6**	**A7**	**A8**
General	0,085	0,161	0,101	0,086	0,124	0,151	0,122	0,121
Técnico	0,035	0,064	0,041	0,035	0,048	0,060	0,050	0,048
Profesor/investigador	0,058	0,109	0,069	0,060	0,084	0,104	0,084	0,058
Otros	0,011	0,024	0,015	0,012	0,019	0,021	0,016	0,017
Contexto Biodigestores Si	0,085	0,161	0,101	0,086	0,124	0,151	0,122	0,121
Contexto Biodigestores No	0,020	0,034	0,022	0,021	0,027	0,033	0,027	0,027

Tabla 7.33. Evaluación de las alternativas según perfil del participante: Lf.

En la tabla 7.33 se muestran los resultados de Lf según el perfil profesional de los participantes y según el contexto de utilización de biodigestores.

Se puede observar que para todos los perfiles profesionales de los participantes y el contexto de utilización de biodigestores, la alterativa con una distancia menor a la solución ideal es la alternativa (A4) recirculación del digestado. Así mismo, todos los perfiles profesionales coinciden en que la alternativa (A1) tanque de desgasificación, puede ser también una alternativa a considerar en la implementación en zonas rurales de Colombia. Estas dos alternativas muestran unos valores de Lf con una diferencia significativa respecto al resto de alternativas.

Por otra parte, todos los participantes coinciden en que la alternativa que presenta una distancia mayor a la ideal es la alternativa (A6) tanque de desgasificación + filtro de arena.

Así pues, en el caso de estudio 2, discriminar entre perfiles profesionales de los participantes y el contexto de utilización de biodigestores, no resulta relevante para seleccionar la alternativa (A4) como la mejor tecnología para tratar el digestado.

8. CONCLUSIONES

A partir del trabajo realizado y con los objetivos marcados al inicio del proyecto, se puede concluir lo siguiente:

Se ha comprobado que la implementación de una herramienta de Análisis Multicriterio es imprescindible para la toma de decisiones en la implementación de una tecnología de postratamiento para el digestado en países en desarrollo. De este modo, su uso facilita la toma de decisiones para escoger entre distintas alternativas de postratamiento del digestado que a priori presentan características beneficiosas similares.

Se ha desarrollado un registro de criterios universales para poder ser aplicados de manera universal en la toma de decisiones de un Análisis Multicriterio de alternativas de postratamiento del digestado en un contexto rural de LAC. Para obtener una lista óptima de criterios universales, se ha considerado la opinión de actores participantes que ha logrado obtener un número relevante de criterios para el desarrollo de la herramienta, considerando aspectos tan relevantes como el técnico, el ambiental, el económico y el social.

La estandarización de los criterios permite que la aplicación de la herramienta pueda ser utilizada en distintos escenarios y por distintos expertos y usuarios, sin limitarse a un único campo de acción. De esta manera, permite a los involucrados centrarse en el problema y no en resolverlo, puesto que de eso se encarga la herramienta de Análisis Multicriterio.

Se ha realizado una recopilación de encuestas a usuarios y expertos de diferentes ámbitos en el área de digestión, para obtener las ponderaciones de los criterios según su importancia y así poder introducir los datos para la resolución de la toma de decisiones.

Los datos de entrada de cada actor participante influyen directamente en el resultado final de la aplicación del Análisis Multicriterio. Por ello, ha sido fundamental escoger participantes expertos en el campo de aplicación para resolver de manera objetiva el problema planteado.

Según los datos obtenido de la encuesta para el Análisis Multicriterio, los participantes creen que los criterios elegidos para la aplicación de la herramienta tienen una fuerte influencia a la hora de escoger la mejor solución para el postratamiento del digestado. Aunque todos los criterios han obtenido ponderaciones de elevada importancia, entre ellos destacan los criterios sociales con ponderaciones superiores a 4, seguido de los criterios del aspecto económico. Con ponderaciones inferiores se encuentran los aspectos técnico y ambiental.

Estas ponderaciones tan elevadas recaen firmemente en la aceptación social de la tecnología y el mejoramiento de las condiciones de vida de las familias y/o comunidades, así como los beneficios económicos que puede suponer la implementación de la tecnología de postratamiento.

Se ha puesto de manifiesto que las ponderaciones según la importancia de cada criterio, diferenciando entre perfiles profesionales y el contexto de utilización de biodigestores, no es muy relevante para obtener resultados diferenciados entre ellos.

En la validación de la herramienta de Análisis Multicriterio se puede concluir que:

En el caso de estudio 1, se ha concluido que la mejor alternativa a implementar en zonas rurales de Colombia para el postratamiento del digestado, es la tecnología del tanque de

desgasificación. Sin embargo, la alternativa de recirculación del digestado es una alternativa cuyo resultado también es positivo para su implementación. Estos resultados están

influenciados por el coste de inversión de las alternativas, así como su fácil implementación y aceptación dentro de la comunidad.

En el caso de estudio 2, se ha concluido que la mejor alternativa de postratamiento para su implementación en zonas rurales de Colombia es la alternativa de recirculación del digestado. Aun así, la tecnología del tanque de desgasificación es una alternativa cuyo resultado ha sido muy similar y, por lo tanto, podría ser implementada en comunidades rurales de Colombia.

9. BIBLIOGRAFÍA

Acosta, Y. L., Abreu, M. C. (2005) 'La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I' ICIDCA, 1(2005), pp. 35-48. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006.

Acosta-Bedoya, F., Martí-Herrero, J., Gonzales, L., (2013) 'Plan del Programa Nacional de Biodigestores en Perú, Perú, (2013). Disponible en: http://www.solucionespracticas.org

Aguilar, D. F., Portela, W. (2009) 'Diseño y montaje del laboratorio de filtro lento de arena para agua potable', Trabajo de Grado, Bogotá, Corporación Universitaria Minuto de Diós. pp. 1–8.

Barrington, S., Choinière, D., Trigui, M., Knight, W. (2002) 'Effect of carbon source on compost nitrogen and carbon losses', *Bioresource Technology*, 83(3), pp. 189–194. doi: 10.1016/S0960-8524(01)00229-2.

Bernal-Calderón, M. P., Alburquerque-Méndez, J. A., Bustamante-Muñoz, M. (2014) De 'Residuo a recurso. El cambio hacia la sostenibilidad'. Mundi-Prensa. p. 15-316.

Brusi, E. R. and Navaz, M. (2017) 'Informe Técnico Para La Construcción De Sistemas De Tratamiento Y Aprovechamiento De Residuos Del Café', p. 60. Disponible en: https://esf-cat.org/wp-content/uploads/2017/04/Informe-técnico-sistemas-tratamiento-y-aprovechamiento-residuos-café.pdf.

Bustillo, A. F. (2008) 'Diseño de una herramieta de evaluación multicriterio'. Trabajo final de carrera, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid: 2008.

Cabello, A. (2017) 'Métodos de decisión multicriterio y sus aplicaciones', Trabajo final de grado, La Rioja, Universidad de la rioja: 2017.

Castro-Molano, L. del P. and Escalante-Hernández, H. (2019) '¿Cómo determinar la calidad de un lodo digerido?', *RedBioLAC*, pp. 79–83.

Chiva-Vicent, S., Berlanga-Clavijo, J. G., Martínez-Cuenca, R. (2018) '*Depuración de aguas residuales: digestión anaerobia*, *Depuración de aguas residuales: digestión anaerobia*'. doi: 10.6035/uji.facsa.2018.2.

Collins, M. R., Eighmy T. T., Fenstermacher J., M., Spanos, S. K. (2016) 'Matter by Conventional Slow Sand Filtration'. American Water Works Assosiation, 1, pp. 80-90. doi: 10.1002/j.1551-8833.1992.tb07357.x.

Colombia. Real Decreto 2014, de 10 de julio, por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, 10 de julio de 2014, núm. 1287, pp.2-15

Conagua. (2020) '*Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento. Operación y mantenimiento de plantas Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento Operación y Mantenimiento de Plantas*', CONAGUA, Disponible en: https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf.

Domenech, B. (2013) 'Metodología para el diseño de sistemas de electrificación autónomos para comunidades rurales', Tesis doctoroal, Catalunya, Universitat Politècnica de Catalunya: 2013.

Droppelmann, C. V., Gaete, C. P. and Miranda, P. (2009) 'Remoción mediante vermicomposteo de los coliformes fecales presentes en lodos biológicos', *Revista Facultad de Ingenieria*, (49), pp. 124–128.

Dominguez, J., Edwards, A., Subler, S. (1997) 'Acomparison of vermicomposting and

composting', BioCycle, pp. 57–59.

Ferrer-martí, L. , Ferrer, I., Sánchez, E., Garfí., M., (2018) 'A multi-criteria decision support tool for the assessment of household biogas digester programmes in rural areas . A case study in Peru', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 95, pp. 74–83. doi: 10.1016/j.rser.2018.06.064.

Fornes, F., Mendoza-Hernández, D., García-de-la-Fuente, R., Abad, M., Belda, M. (2012) 'Composting versus vermicomposting: A comparative study of organic matter evolution through straight and combined processes', *Bioresource Technology*. Elsevier, 118, pp. 296–305. doi: 10.1016/j.biortech.2012.05.028.

Garfí, M., Gelman, P., Comas, J., Carrasco, W., Ferrer, I. (2011) 'Agricultural reuse of the digestate from low-cost tubular digesters in rural Andean communities', *Waste Management*, 31(12), pp. 2584–2589. doi: 10.1016/j.wasman.2011.08.007.

Garfí, M., Martí-Herrero J., Garwood, A., Ferrer, I. (2016) 'Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 60, pp. 599–614. doi: 10.1016/j.rser.2016.01.071.

Garfí, M., Castro L., Montero, N., Escalante, H., Ferrer, I. (2019) 'Evaluating environmental benefits of low-cost biogas digesters in small-scale farms in Colombia: A life cycle assessment', *Bioresource Technology*. Elsevier, 274, pp. 541–548. doi: 10.1016/j.biortech.2018.12.007.

Garfì, M., Tondelli, S., Bonoli, A. (2009) 'Multi-criteria decision analysis for waste management in Saharawi refugee camps', *Waste Management*, 29(10), pp. 2729–2739. doi: 10.1016/j.wasman.2009.05.019.

Garg, P., Gupta, A, Satya S. (2006) 'Vermicomposting of different types of waste using Eisenia foetida: A comparative study', *Bioresource Technology*, 97(3), pp. 391–395. doi: 10.1016/j.biortech.2005.03.009.

Iaconi, C, Baeten, J., Castro P. (2017) '*Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies*'. pp. 1-633. Disponible en: https://www.iwapublishing.com/books/9781780407869/innovative-wastewater-treatment-resource-recovery-technologies-impacts-energy.

IDAE (2007) '*Biomasa: Digestores anaerobios*, *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía ' (IDAE)*. doi: ISBN-13: 978-84-96680-21-0.

Maldonado, V. (2004) 'Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual 1: Teoría. Capítulo 9.', pp. 83–88. Disponible en: http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualI/tomoII/nueve.pdf.

Metcalf & Eddy, I. (1995) 'Metcalf-Eddy Wastewater Engineering Treatment and Reuse', pp. 129–130.

Méndez, J. P., Solsona, F. (2002) *Desinfección del agua*. Panamà, Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2020. Disponible en: www.cepis.ops-oms. (Accessed: 15 July 2020).

Morillas, J. (2016) 'Estudio de vermicompostaje de compost de residuos orgánicos de distinta naturaleza'. Trabajo final de máster, Elche, Universidad Miguel Hernández de Elche: 2016.

Otero, N. (2006) *Filtración de aguas residuales para reutilización*, *Ciencias Y Tecnologías/29*. Tesis Doctoral, Tenerife, Universidad de la Laguna: 2006. Disponible en:

https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/10239/cp273.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Parra, R. A. (2015) 'Anaerobic digestión: biotechnological mechanisms in waste water treatments and their application in food industry', *Producción + Limpia*, 10(2), pp. 142–159. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-04552015000200014.

RedBioLAC. (2020) '*Biodigestores*' [En línea] Latinoamerica y el Caribe, Disponible en: http://redbiolac.org/los-biodigestores/ (Accessed: 24 August 2020).

Santos S., Urquiaga, R. (2013) 'Compostaje y vermicompostaje domésticos', Madrid , Centro Nacional de Educación Ambiental - Siempre en Medio: 2013.

Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox. (2020) '*Filtración lenta de arena*' [en línea]. Disponible en: https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/filtración-lenta-de-arena

Torres, C., Villanueva S., (2013) '*El Filtro de Arena Lento : Manual para el armado, instalación y monitoreo*', *Igarss 2014*. doi: 10.1007/s13398-014-0173-7.2.

Tzatchkov, V. G., Villagómez, I. A. (2007) '*Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de Lagunas de estabilización*', *CONAGUA*. Disponible en: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/10DisenoDeLagunasDeEstabilizacion.pdf.

Blancio-Ordoñez, D. A., Palacios-Pérez, J. L. (2011) 'Filtros biológicos para la potabilización del agua posibilidades de uso de FLA (filtros lentos de arena) con agua superficial de neutra región. Tesis doctoral. Cuenca Ecuador, Universidad de cuenca' (2011).

Torres-Parra, C. A., Villanueva-Perdomo, S. (2013) 'El filtro de arena lento: manual para el armado, instalación y mantenimiento'. Bogotá. Univerisdad Piloto de Colombia (2013). pp. 52-53

Varnedo, M. T. (2011) 'Manual del Biogás', Santiago de Chile, Proyecto CHI/00/G32, FAO,p. 120. doi: 10.1073/pnas.0703993104.

Vermican (2019) Manual de vermicompostaje' Soluciones de copostaje. Gestión ecológica de residuos orgánicos. Navarra. pp. 3-23. Disponible en: http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/campus/doc/htmls/sostenibilidad/ManualVermicompostaje.pdf.

Wang, J. *et al.* (2020) 'Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision- making Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy', 13 (9), 2263-2278. doi: 10.1016/j.rser.2009.06.021.

Wu, T. Y., Lim, S. L., Shak, K. P. Y. (2014) 'Biotransformation of biodegradable solid wastes into organic fertilizers using composting or/and Vermicomposting', *Chemical Engineering Transactions*, 39 (Special Issue), pp. 1579–1584. doi: 10.3303/CET1439264.

Zunzunegi-Suárez. A. (2017) 'La teoría de la decisión multicriterio', Trabajo final de grado, Cantabria, Universidad de Cantabira: 2017.

ANEXOS

ANEXO I. ENCUESTA

Introducción y objetivos:
Los biodigestores de bajo coste son tecnologías que permiten obtener, a partir de residuos orgánicos, combustible limpio (biogás) y un digestado que puede utilizarse en agricultura. Para que el digestado se pueda utilizar en agricultura como fertilizante, enmienda, etc., sin ningún ulterior tratamiento debe cumplir los requisitos establecidos por la ley. Cuando estos requisitos no se cumplen, el digestado necesitará un postratamiento antes de su reutilización en agricultura (por ejemplo, filtro de arena, maduración aerobia, vermicompostaje, etc.) Se pretende desarrollar una metodología multi-criterio para definir la mejor solución para el postratamiento del digestado considerando aspectos/criterios técnicos, ambientales, económicos y sociales. El objetivo de esta encuesta es obtener la opinión de expertos de diferentes ámbitos para poder ponderar los diferentes criterios. Así mismo, se ha dejado un espacio libre para proponer nuevos criterios si se considera necesario.

Perfil del participante	
Organización a la que pertenece	
Perfil	☐ Técnico ☐ Sociólogo ☐ Profesor/Investigador ☐ Otros (Indicar):
Tipo de tecnologías de biodigestores y de post-tratamiento de digestado con la que ha trabajado	☐ Digestores tubulares ☐ Digestores de hormigón ☐ Otros (Indicar):
	☐ Aplicación directa de digestado ☐ Tanque de desgasificación ☐ Filtro de arena ☐ Vermicompostaje ☐ Conversión térmica ☐ Recirculación del digestado ☐ Recuperación de estruvita ☐ Maduración aerobia ☐ Otros (Indicar):
Regiones de aplicación de biodigestores	
País / Ciudad	
Área	☐Montañoso ☐Tropical ☐Otros (indicar): _____

Clima	☐Tropical ☐Templado ☐ Estepario ☐Templado frío ☐de Montaña ☐Otros (indicar): _____
Datos de contacto (opcional)	
Nombre	
Correo electrónico	

Comentarios adicionales

Instrucciones:

1. Ponderar los criterios según su importancia, siendo 1 POCO IMPORTANTE y 5 MUY IMPORTANTE.
2. Valorar la seguridad con la que el experto pondera la importancia de cada criterio, siendo 1 MUY INSEGURO y 5 COMPLETAMENTE SEGURO (para el análisis de sensibilidad de los resultados)
3. Enviar a:

Se ha dejado un espacio libre para proponer criterios que se consideren importantes a tener en cuenta. Así mismo se puede proponer quitar algunos criterios que no parecen apropiados.

Aspectos		**Sub-criterios**	**Ponderación de la importancia de los criterios: 1 POCO IMPORTANTE y 5 MUY IMPORTANTE**	**Valoración de la seguridad con la que el experto pondera la importancia de cada criterio: 1 MUY INSEGURO y 5 COMPLETAMENTE SEGURO**	**Comentarios**

Técnicos	CT1	Contenidos químicos-metales			
	CT2	Contenidos microbiológicos			
	CT3	Contenido de materia seca			
	CT4	Contenido de nutrientes			
	CT5	pH			
	CT6	Conductividad eléctrica			
	CT7	Producción de biogás/potencial de biometanización residual (en el digestado)			
	CT8	Necesidad de personal cualificado			
	CT9	Facilidad de construcción e implementación			
	CT10	Facilidad de mantenimiento			
	CT12	Necesidad de superficie			
	CT13	Vida útil			
Ambientales	CA1	Generación de residuos			
	CA2	Emisiones al aire (partículas)			
	CA3	Emisiones al suelo			
	CA4	Emisiones al agua			
	CA5	Emisiones de olores			
	CA6	Emisiones de gases de efecto invernadero			
	CA7	Generación de aerosoles (patógenos)			
	CA8	Sostenibilidad de los materiales			
	CA9	Consumo de agua			
	CA10	Consumo de energía			
Económicos	CE1	Inversión inicial (Capacidad de pago)			
	CE2	Coste de mantenimiento			
	CE3	Generación de ingresos			
	CE4	Capacidad de ahorro			

Sociales	CS1	Mejoramiento de las condiciones de vida			
	CS2	Grado de aceptación			
	CS3	Equidad de género			
	CS4	Beneficios en la salud			

Aspectos		**Sub-criterios**	**Ponderación**	**Valoración**	**Comentarios**