



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

ICADE

CIHS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

# **Fertilizantes a partir de residuos: Integración en la economía circular y en la sostenibilidad**

Autor

Carmen Martín-Sanz Garrido

Directores

Marta Revuelta Aramburu

Carlos Morales Polo

Madrid

Julio 2023

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
**Fertilizantes a partir de residuos: integración en la economía circular y en la  
sostenibilidad**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido  
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

MARTIN-  
SANZ  
GARRIDO  
CARMEN -  
51122006K  
Firmado digitalmente por  
MARTIN-SANZ  
GARRIDO  
CARMEN -  
51122006K  
Fecha: 2023.07.17  
18:21:57 +02'00'

Fdo.: Carmen Martín-Sanz Garrido

Fecha: 10/07/2023

Autorizada la entrega del proyecto

**EL DIRECTOR DEL PROYECTO**

REVUELTA  
ARAMBURU  
MARTA -  
02641691A  
Firmado digitalmente  
por REVUELTA  
ARAMBURU MARTA -  
02641691A  
Fecha: 2023.07.17  
18:13:11 +02'00'

Fdo.: Marta Revuelta Aramburu

Firmado digitalmente por Carlos  
Morales Polo  
Nombre de reconocimiento (DN):  
cn=Carlos Morales Polo, o, ou,  
email=cmorales@comillas.edu, c=ES

Fecha: 15/07/2023

Fdo.: Carlos Morales Polo

Fecha: 15/07/2023



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

ICADE

CIHS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

# **Fertilizantes a partir de residuos: Integración en la economía circular y en la sostenibilidad**

Autor

Carmen Martín-Sanz Garrido

Directores

Marta Revuelta Aramburu

Carlos Morales Polo

Madrid

Julio 2023

# FERTILIZANTES A PARTIR DE RESIDUOS: INTEGRACIÓN EN LA ECONOMÍA CIRCULAR Y EN LA SOSTENIBILIDAD

**Autor: Martín-Sanz Garrido, Carmen.**

Director: Revuelta Aramburu, Marta. Morales Polo, Carlos.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

Se ha realizado un análisis de ciclo de vida para evaluar la integración de la economía circular y en la sostenibilidad del digestato procedente de la digestión anaerobia en su uso como fertilizante orgánico, y comparando sus resultados frente a los fertilizantes inorgánicos empleados actualmente. Este estudio se basa en el análisis de 23 casos distintos de los residuos reales procedentes de mercados de abastos de España.

**Palabras clave:** Fertilizantes orgánicos; A.C.V.; Economía Circular; Mercasa; Sostenibilidad; Digestión Anaerobia; Residuos orgánicos

### 1. Introducción

Actualmente, la Unión Europea se encuentra en plena búsqueda y desarrollo de fuentes de energía renovable que sustituyan a los recursos fósiles utilizados hasta la fecha, además de luchar con la creciente cantidad de residuos que generan sus poblaciones. En este contexto, la digestión anaerobia presenta una oportunidad no sólo de transición energética, sino también de desarrollo de economías locales y de avance en la implantación del concepto de economía circular en la sociedad.

Otra ventaja de la digestión anaerobia es que produce un residuo llamado digestato, un lodo orgánico rico en nutrientes. La ventaja es que el digestato contiene exactamente los mismos nutrientes que entran al digestor, lo que lo convierte en un fertilizante orgánico muy rico, y cuyo uso reduce la necesidad de fertilizantes químicos y promueve la sostenibilidad del suelo.

Es precisamente esta última faceta de la D.A. la que motiva este estudio: la utilización del digestato como vehículo de economía circular mediante su aplicación como biofertilizante. Este concepto no es nuevo, sin embargo, pocos estudios se han centrado en la comparación de impactos ambientales entre los fertilizantes comunes (inorgánicos) y los derivados del digestato, así como el ahorro de materias primas y recursos fósiles que supone sustituir los fertilizantes por el digestato.

A lo largo de este estudio, se analizará en profundidad el proceso de producción del biofertilizante derivado del digestato para poder realizar un Análisis de Ciclo de Vida (A.C.V.) del mismo, y compararlo con A.C.V. de fertilizantes inorgánicos tipo NPK (los utilizados en la mayoría de los cultivos actuales). Como las propiedades e impactos ambientales del digestato dependen fundamentalmente del tipo de residuo tratado en la D.A., y con el fin de poder emplear datos relevantes para la industria española, se realizarán A.C.V.

separados para la cantidad y composición concreta de los distintos residuos orgánicos generados en cada Mercado de Abastos de España.

## **2. Definición del proyecto**

El objetivo final de este proyecto es cuantificar el nivel de integración en la economía circular del uso del digestato como biofertilizante para cultivos agrarios, sustituyendo así a los fertilizantes utilizados en la actualidad. Con el fin de poder cuantificarlo, se va a realizar un Análisis de Ciclo de Vida (A.C.V.) del digestato como biofertilizante, a partir de los residuos de los grandes mercados de abastos del país. Para poder lograr dicho objetivo, se han de cumplir ciertos pasos previos de acuerdo con el siguiente orden:

- Establecer las bases del A.C.V. a realizar: límites del sistema, unidad funcional e impactos a analizar. Estos son los parámetros fundamentales que acotan el alcance del estudio tanto aguas arriba como aguas abajo de la producción del fertilizante orgánico, así como la magnitud y unidad a la que se referirán todos los resultados del estudio. También es de suma importancia definir qué impactos ambientales se van a analizar, para así asegurarse que se proporciona la información correcta al modelo de A.C.V.
- Realización del inventario del A.C.V.: consiste en determinar todos los procesos que se van a tener en cuenta en el inventario de impactos, así como todas las materias primas, productos, subproductos y residuos de éstos. Para esta fase será también necesario analizar los residuos entrantes al digestor en el caso de cada merca (su cantidad y composición), ya que estos determinarán la calidad del digestato y, consecuentemente, la del biofertilizante.
- Cálculo del A.C.V. e interpretación de los resultados. Una vez se ha completado el inventario, se obtienen los resultados del A.C.V. a través del método CML. Estos resultados primero serán analizados separadamente en las distintas fases del proceso para ajustar el modelo si es necesario. Posteriormente, se compararán los resultados obtenidos para en distintas mercas para analizar el impacto que tiene la calidad (mezcla de residuos orgánicos) de los residuos a la entrada del digestor.
- Análisis de inclusión en la sostenibilidad. Se comparan los resultados obtenidos para los 23 biofertilizantes de los mercados de abastos con fertilizantes inorgánicos de igual composición, con el fin de cuantificar el ahorro en impactos ambientales que supone el uso del biofertilizante en lugar del inorgánico.

## **3. Descripción del modelo**

En un primer paso de este apartado se detallarán las bases del A.C.V. a realizar, seguido de la elaboración del inventario de análisis ciclo de vida del biofertilizante.

### **3.1. Objetivo y alcance del A.C.V.**

El objetivo de este A.C.V. es obtener los impactos medioambientales de la producción de fertilizante orgánico a partir del digestato de la digestión anaerobia. El alcance de este A.C.V. engloba digestatos originados con distintas mezclas de residuos y en distintas cantidades,

para poder analizar también la variabilidad de los resultados en función de los sustratos empleados en la etapa de digestión anaerobia.

### 3.1.1. Función y Unidad Funcional

El ACV que se va a realizar en este proyecto es un ACV atribucional, es decir, se tratará de representar el proceso del biofertilizante aislado del resto de la economía y estableciendo unos límites claros a partir de los cuales se dejan de tener en cuenta sus impactos.

La unidad funcional de un ACV es la cantidad medible de producto para la cual se van a contabilizar los impactos del inventario. En este proyecto, la unidad funcional será 1 kg de biofertilizante producido a partir del digestato.

### 3.1.2. Límites del sistema

Como ya se ha explicado con anterioridad, los límites del sistema representan los puntos a partir de los cuales se dejan de tener en cuenta los impactos del proceso. A continuación, se detallan las fronteras del sistema, ilustrados en la Ilustración 1.

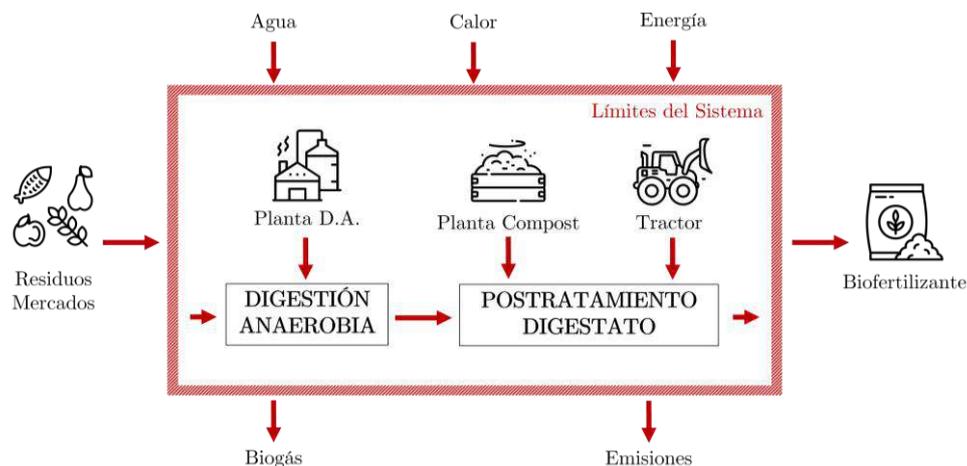


Ilustración 1 – Alcance del inventario del análisis de ciclo de vida

- Este ACV pretende analizar los impactos para la producción del biofertilizante. Por lo tanto, sólo se tendrán en cuenta los flujos de operación del digestor, y se despreciarán las actividades de recarga (limpieza del digestor y recarga del sustrato de microorganismos).
- Para el proceso del biofertilizante, los límites del sistema son; aguas arriba, la entrada de los residuos orgánicos al digestor y, aguas abajo, la obtención del biofertilizante. El objetivo de este estudio es comparar los impactos de producción del biofertilizante y el fertilizante inorgánico común, por lo que el inventario de análisis de ciclo de vida termina con la obtención de dichos productos, y el impacto de éstos tras su aplicación no será analizado.
- En cuanto a la infraestructura utilizada durante el proceso, se tendrá en cuenta la planta de digestión anaerobia o digestor, y la planta de compost. Para poder inventariar los impactos correspondientes a la infraestructura por kg de biofertilizante producido, habrá que contabilizar sus impactos de construcción totales y dividirlos por la cantidad de residuos tratados a lo largo de su vida útil.

- No se contemplará el transporte de los residuos orgánicos del mercado de abastos al digestor, sino que se supone que el digestor se encuentra en las instalaciones propias del mercado. Tampoco habrá transporte del digestato para su postratamiento, ya que este se realizará in situ.
- En este estudio sólo se contemplarán emisiones atmosféricas de los procesos tratados. En todo momento se asume que la digestión anaerobia de residuos y el postratamiento de digestato se realizan en plantas homologadas con dispositivos de prevención de fugas al suelo y equipos de tratamiento de aguas residuales, que impiden cualquier tipo de emisión de contaminantes al suelo y aguas locales.

### 3.2. Inventario del A.C.V.

El inventario de un A.C.V. es donde se recopilan todos los procesos que son necesarios para la elaboración de la unidad funcional, y que están comprendidos dentro de los límites del sistema. A continuación, la Ilustración 2 muestra la estructura del inventario establecida para este estudio, de acuerdo con los niveles de importancia de los flujos de producción de los procesos que intervienen en la obtención del biofertilizante.

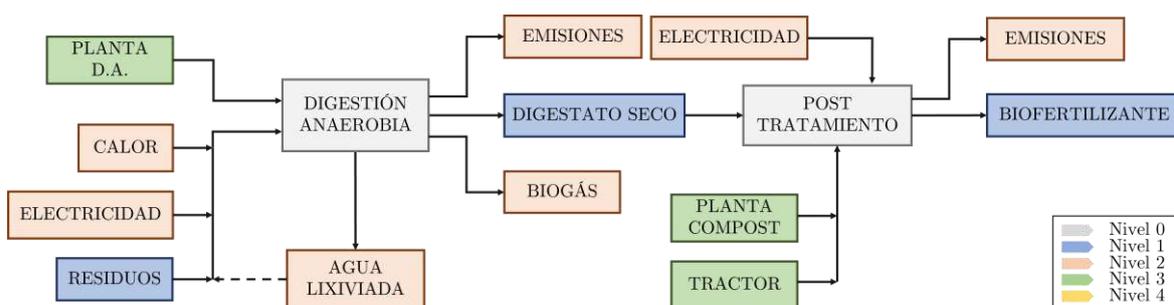


Ilustración 2 – Estructura del inventario del análisis de ciclo de vida

Para simplificar la identificación de flujos unitarios, el inventario del A.C.V. se ha dividido en dos procesos principales: digestión anaerobia de los residuos orgánicos y postratamiento del digestato. A continuación, se explican los flujos atribuidos a cada uno de los procesos:

#### 3.2.1. Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que los microorganismos descomponen la materia orgánica entrante en ausencia de oxígeno, que se compone de 4 etapas principales: hidrólisis, acetogénesis, acidogénesis y metanogénesis [1]. Tras este proceso, los residuos orgánicos entrantes se transforman en hidrógeno, metano y dióxido de carbono, acompañados del digestato: la materia sólida y líquida estabilizada que no ha podido ser transformada en biogás. Los flujos de proceso considerados para el inventario del A.C.V. son los siguientes (a continuación, se proporciona una breve explicación de cada flujo, en el estudio se analizan las cantidades y calidades para cada uno de los 23 casos tratados):

- Residuos orgánicos de los mercados de abastos. Estos residuos varían en cantidad y composición (porcentaje de carne, pescado, fruta y verdura) en función del mercado de abastos considerado [2].

- Agua añadida para controlar el pH del proceso. Esta agua es necesaria para optimizar la producción del biogás del proceso, y proviene de una recirculación de la fracción líquida del digestato saliente del proceso [3].
- Infraestructura del proceso. Se toma un digestor estándar para los 23 casos, y cuyo impacto ambiental en el biofertilizante corresponde a la amortización de la infraestructura total correspondiente a cada kg de digestato producido.
- Calor y electricidad aportados al proceso. Para cada mercado, se calcula la cantidad de biogás producido y las necesidades de calor y electricidad necesarios para abastecer al proceso, de acuerdo con las hipótesis formuladas en [4]. Asimismo, se determina qué porcentaje de estas necesidades se pueden abastecer con el biogás del proceso, evitando así consumir electricidad y gas de la red.
- Biogás producido en el digestor. Se emplean las hipótesis de [4] para cada caso con el fin de obtener el biogás y biometano obtenido en el digestor. Esta cantidad producida se compara posteriormente con las necesidades energéticas para evaluar la autosuficiencia del proceso y la cantidad de biogás que se aporta a la red.
- Digestato saliente de la D.A., cuya composición y cantidad depende de los residuos entrantes al digestor [4].
- Emisiones atmosféricas del proceso de D.A. Se considera que el proceso empleado recupera todos los gases salientes del digestor para su uso como biogás. Sin embargo, se tienen en cuenta como emisiones las fugas de biogás que pueda tener el proceso en todas sus etapas, para las que se han utilizado las cantidades expuestas en [5].

### 3.2.2. Postratamiento: compost

El digestato resultante de la D.A. tiene contenido de humedad considerable y todavía no se encuentra en condiciones óptimas para su empleo en suelos, por lo que se somete a un proceso de compostaje: una técnica biológica, aérea y controlada de estabilización y tratamiento de residuos orgánicos biodegradables, tanto sólidos como semisólidos. Al igual que con el proceso de D.A., los siguientes flujos de proceso se han realizado a medida para cada uno de los 23 casos estudiados.

- Digestato saliente de la digestión anaerobia, cuya composición depende de los residuos tratados, y al cual se le ha retirado un 60% ([3]) de su humedad inicial para recircularla al proceso.
- Infraestructura del proceso. Al igual que con la D.A., se utiliza la amortización de la planta por kg de biofertilizante producido.
- Uso y amortización de la maquinaria de aireación (tractor) del digestato. En el compostaje, es necesario remover el sustrato con frecuencia para proporcionar oxígeno a los microorganismos del proceso. Esta aireación se realiza con una pala mecánica con motor diésel, cuya amortización y emisiones dependen de la cantidad de digestato tratado.
- Electricidad de operación de la planta de compost, la cual viene establecida en función de la masa de digestato tratado.
- Emisiones atmosféricas. Se han establecido las emisiones atmosféricas que produce el compost por cantidad de digestato tratado. Puesto que el compost se realiza

generalmente en instalaciones abiertas, la totalidad de estas emisiones generadas se emiten a la atmósfera.

- Biofertilizante obtenido tras el proceso de compost. Para cada mercado, se ha realizado un balance de masa del proceso de compost, obteniendo así la cantidad y composición del biofertilizante resultante.

Una vez detalladas las cantidades y calidades de cada flujo de proceso en función del mercado a analizar, se ha construido el inventario en Simapro, de acuerdo con la estructura presentada en la Ilustración 2, el inventario del análisis de ciclo de vida.

#### 4. Resultados

Una vez se ha construido el inventario del A.C.V., se ha procedido a calcular los impactos asociados a éste de acuerdo con el método CML. El método CML, una metodología creada por el Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden en 1992, y que cuantifica el impacto medioambiental de los procesos en 11 categorías de impacto: agotamiento de recursos abióticos, agotamiento de recursos fósiles, contribución al cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana, marina, de aguas dulces y terrestre, oxidación fotoquímica, acidificación y eutrofización.

Los resultados del estudio contienen, en una primera fase, la cuantificación de las 11 categorías de impacto para los 23 casos estudiados, seguido de un análisis de sensibilidad de los resultados al dimensionamiento de la infraestructura. En una segunda fase, y con el objetivo de evaluar la sostenibilidad de los biofertilizantes obtenidos, se comparan los resultados obtenidos con los de A.C.V. de fertilizantes inorgánicos de misma composición.

##### 4.1. Resultados generales por categoría de impacto

Tras haber obtenido los resultados brutos para cada uno de los 23 casos, se ha realizado una comparación por categoría de impacto para poder evaluar cómo las diferencias entre calidades cantidades de residuos orgánicos afectan a los resultados obtenidos. A continuación, la Ilustración 3 representa los resultados obtenidos para la categoría de contribución al calentamiento global, medido en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (en el estudio se muestra el análisis de las otras 9 categorías de impacto).

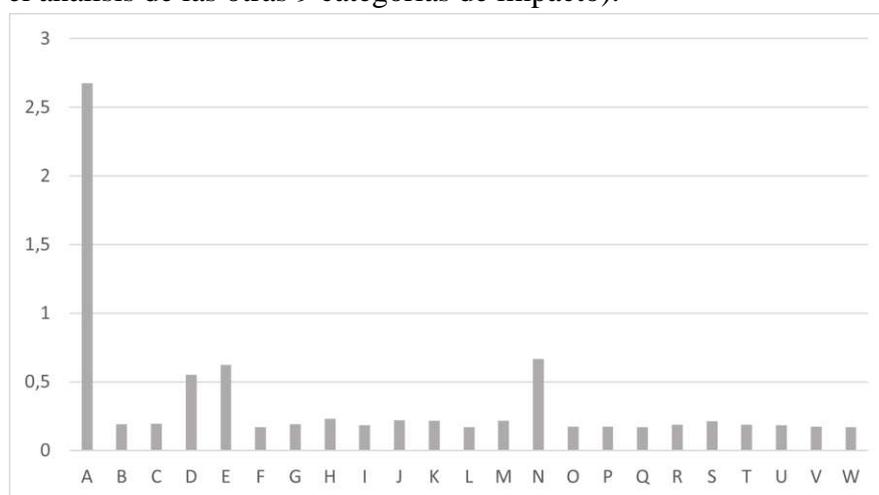


Ilustración 3 – Comparación de resultados de potencial de calentamiento global (kg CO<sub>2</sub> eq.) para todos los mercados

Tal y como se puede apreciar en la Ilustración 3, se aprecian 4 niveles de resultados distintos, los cuales dependen fundamentalmente de la cantidad de residuos orgánicos y el diseño de la infraestructura empleado en el estudio, y que se repiten para las demás categorías de impacto.

De acuerdo con la Ilustración 3, el potencial de calentamiento global del mercado A es hasta 11 veces superior que el del resto de mercados. Este resultado se debe a un sobredimensionamiento de la infraestructura de digestión anaerobia, causando un mayor impacto de amortización de ésta por kg de biofertilizante producido. El mismo fenómeno, aunque a menor escala ocurre en el mercado D, que también muestra resultados anómalos.

También cabe destacar el impacto del infra dimensionamiento de infraestructura que ocurre en los mercados N y E, la cual, debido a la gran afluencia de residuos de los mercados de abastos, no genera el suficiente biogás para que la digestión anaerobia sea autosuficiente. A priori, un menor impacto proporcional de infraestructura, lo que daría un mejor resultado, pero, sin embargo, los impactos derivados de la proporción fósil del mix eléctrico nacional aportan un CO<sub>2</sub> equivalente que hace triplicar los resultados de los demás mercados.

En un último nivel podemos encontrar los 19 casos restantes, los cuales presentan los mismos resultados salvo por pequeñas diferencias de dimensionamiento.

#### 4.2. Sensibilidad de los resultados al dimensionamiento de la infraestructura

A la vista del impacto en los resultados que se observa debido al sobre o infra dimensionamiento de la infraestructura, se ha realizado un análisis de sensibilidad a la infraestructura de los resultados obtenidos para las 11 categorías de impacto, analizando así los resultados obtenidos si se excluyen las infraestructuras de los procesos, y el impacto por categoría de impacto que estas tienen en cada uno de los 23 casos.

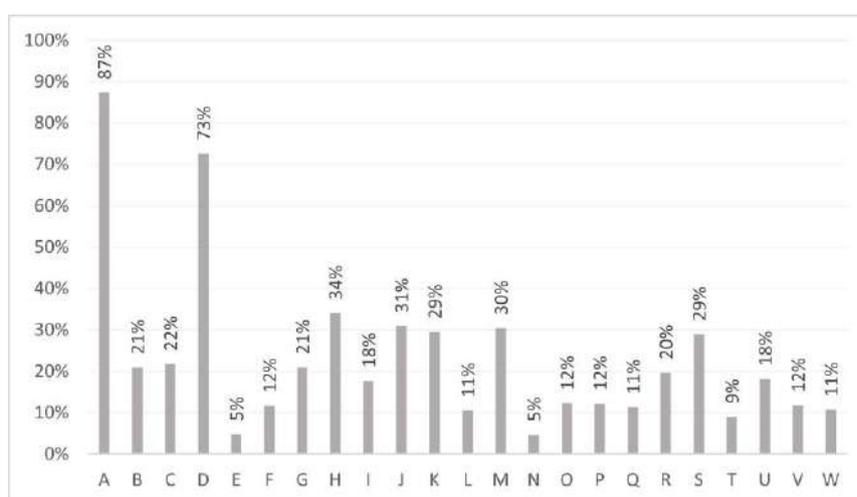


Ilustración 4 – Sensibilidad de los resultados a la inclusión de la infraestructura en el análisis

La Ilustración 4 muestra claramente los efectos de la infraestructura en la categoría de contribución al cambio climático, donde se puede ver con claridad que solo la infraestructura conforma casi la totalidad de impacto obtenida para los mercados A y D, y sólo un 5% para los mercados N y E. Este fenómeno ocurre, aunque a distintas escalas, en el resto de las categorías de impacto estudiadas.

### 4.3. Comparación de los resultados del A.C.V. con fertilizantes inorgánicos

Para poder comparar de manera justa el biofertilizante con los fertilizantes comerciales que se usan generalmente en la agricultura, y así poder evaluarlos como una alternativa sostenible, es necesario que estos tengan la misma composición (ya que una diferencia en la composición puede resultar en una diferencia sustancial en los resultados del A.C.V.). Por este motivo, se comparará cada biofertilizante con un fertilizante tipo NPK (que contiene nitrógeno, fósforo y potasio) de igual composición.

Es importante destacar que estos fertilizantes inorgánicos tienen composiciones hechas a medida para poder compararlos correctamente con el biofertilizante de los mercados, pero ninguno de ellos presenta una composición de fertilizante inorgánico habitual en la agricultura. En un futuro, si que quisiese obtener una composición de biofertilizante que sustituya a los fertilizantes comunes, habrá que variar los porcentajes de cada sustrato a la entrada del proceso de D.A.

A continuación, se analizarán 4 de los mercados del estudio como casos representativos. Para cada uno de ellos, se analizará el impacto del fertilizante inorgánico sobre el del biofertilizante de manera que, si se obtiene una puntuación superior al 100%, el biofertilizante tiene un menor impacto que el fertilizante comercial (inorgánico).

- Mercado A: Este caso representa el fenómeno de sobredimensionamiento de infraestructura que se ha observado en el análisis por categorías de impacto, además de ser uno de los mercados no autosuficientes en el proceso de digestión anaerobia. En la Ilustración 5 se puede ver que el biofertilizante supera al fertilizante comercial en todas las categorías de impacto del método CML, concluyendo que el biofertilizante es, en este caso, menos sostenible que un fertilizante inorgánico común.

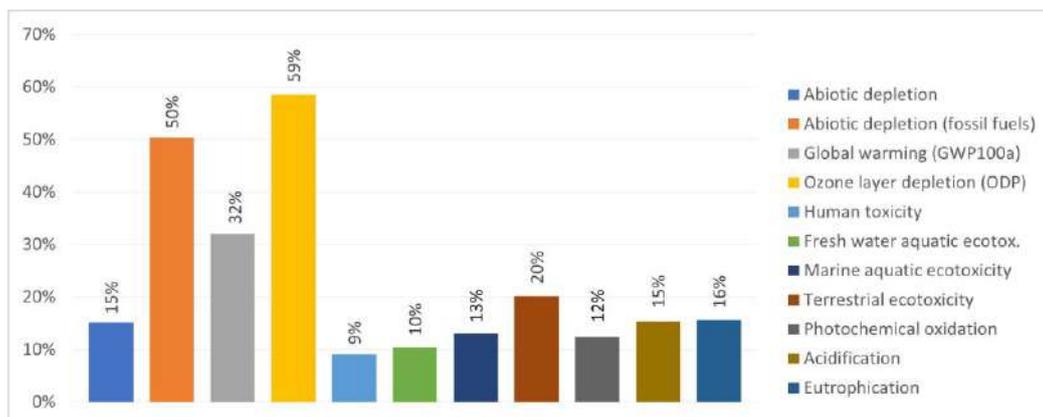


Ilustración 5 – Comparación de resultados de fertilizante inorgánico y biofertilizante para el mercado A

- Mercado D: El mercado D vuelve a tener una infraestructura mucho más grande de lo necesario, aunque, en este caso, el volumen de residuos que trata es suficiente para poder generar el calor requerido por el digestor, por lo que no requiere energía de la red eléctrica. Al ser autosuficiente, se mejoran considerablemente los resultados obtenidos (Ilustración 6), llegando un biofertilizante competitivo en las categorías de agotamiento de combustibles fósiles y destrucción de la capa de ozono.
- Caso G, Córdoba: Este caso es el caso tipo, ya que representa a los 19 mercados restantes al no presentar problemas de sobredimensionamiento ni autosuficiencia, además de

utilizar residuo variado en el origen del proceso productivo. Este es el mejor caso posible, ya que reproduce las condiciones reales de un biofertilizante de digestato que proviene de una planta de D.A. correctamente dimensionada para el volumen entrante de residuos, por lo que permite realizar una comparación en igualdad de condiciones con el fertilizante inorgánico. La Ilustración 7 muestra como el biofertilizante mejora los resultados del fertilizante orgánico en 9 de las 11 categorías de impacto analizadas y, en muchas de ellas, siendo hasta varias veces más sostenible (superando el 100% de reducción del impacto).

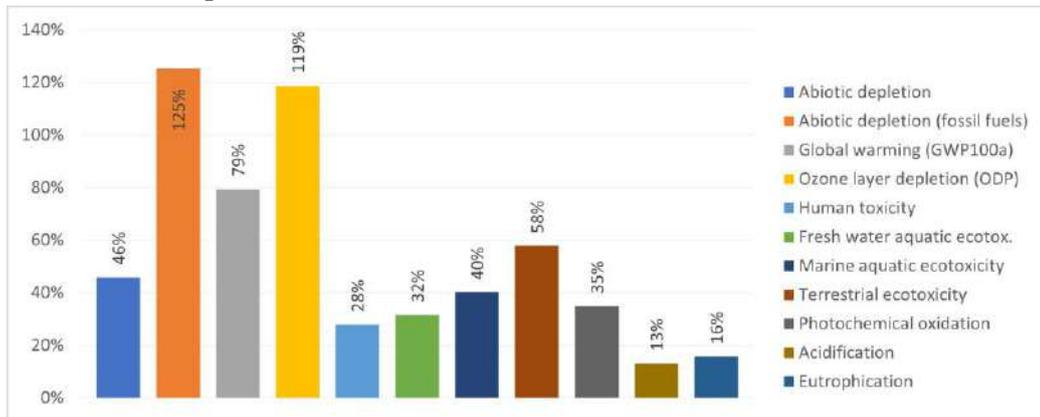


Ilustración 6 - Comparación de resultados de fertilizante inorgánico y biofertilizante para el mercado D

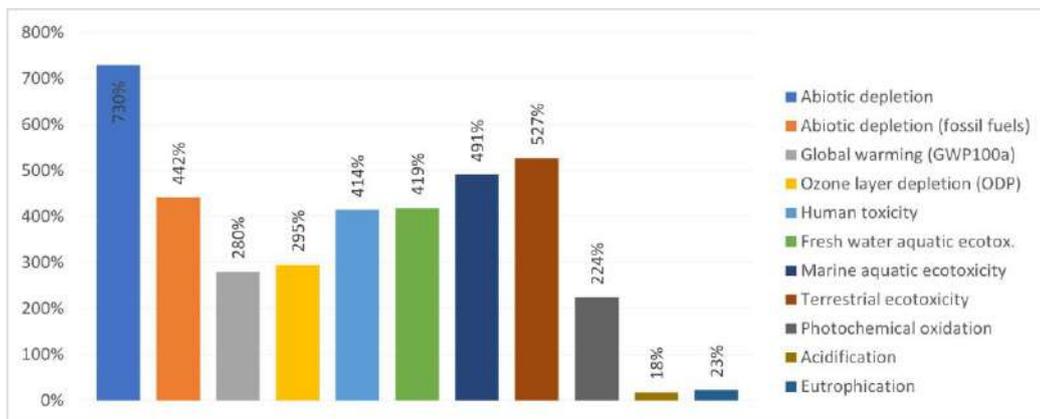


Ilustración 7 - Comparación de resultados de fertilizante inorgánico y biofertilizante para el mercado G

- Mercado N:** El mercado N, como el E, presenta el caso opuesto al mercado A: un infra dimensionamiento de la infraestructura. Este mercado genera demasiados residuos para el tamaño de digestor establecido, por lo que no se genera suficiente biogás para la gran demanda de energía que tiene el digestor. A priori, este infra dimensionamiento debería de mejorar los resultados con respecto al caso típico (se puede ver en el gran resultado en el agotamiento de recursos naturales), ya que el impacto de la infraestructura por kg de biofertilizante se ve reducido de manera considerable, pero la energía requerida de la red añade los impactos del mix energético nacional, aumentando los resultados para todas las categorías. Es por este motivo que la Figura 8 tiene un resultado medio: mejor que el del mercado A, pero no llegando a las 9 categorías mejoradas del caso típico.

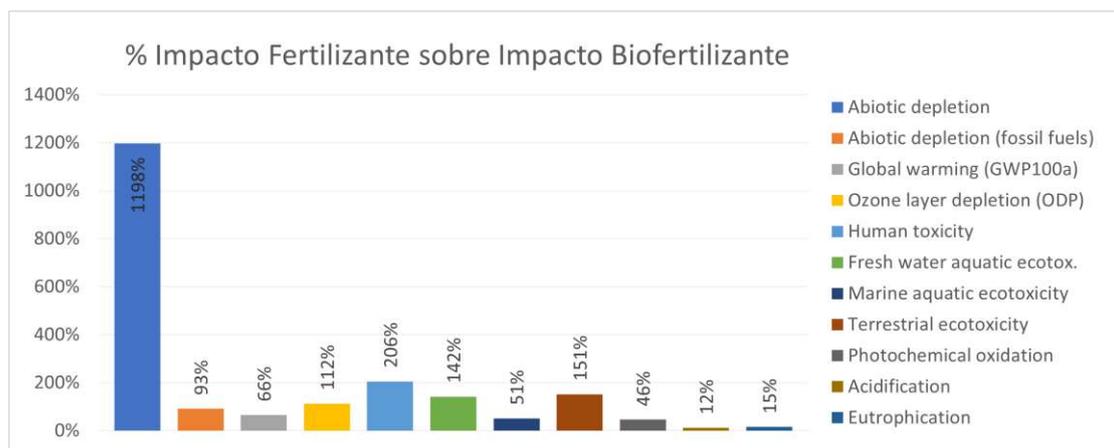


Ilustración 8 - Comparación de resultados de fertilizante inorgánico y biofertilizante para el mercado N

## 5. Conclusiones

A lo largo del estudio, se ha detallado la construcción del modelo de producción de biofertilizante, así como su evaluación ambiental frente a la alternativa actual: los fertilizantes inorgánicos. Para ello, se han escogido fertilizantes inorgánicos de igual composición a la del biofertilizante obtenido para cada uno de los 23 mercados estudiados a través de un proceso de digestión anaerobia y compost estandarizado.

Los resultados de esta comparación varían sustancialmente dependiendo del volumen y composición de residuos de cada caso, así como la categoría ambiental en la que se establece dicha comparación. Con el fin de poder comparar de manera definitiva los resultados obtenidos para fertilizante y biofertilizante (y así determinar cuál de ellos es mejor, medioambientalmente hablando), se han convertido a valores unitarios las puntuaciones de cada una de las categorías, obteniendo así una puntuación total agregada para cada producto. A continuación, la Ilustración 9 muestra para cada mercado el tanto por ciento de ahorro de impactos ambientales del biofertilizante con respecto al fertilizante.



Ilustración 9 – Comparación unitaria entre fertilizante y biofertilizante para los 23 casos estudiados

17 de los 23 casos estudiados suponen una reducción de los impactos totales al medioambiente sobre su fertilizante de comparación. Destacan negativamente los siguientes casos:

- Mercado A, debido al sobredimensionamiento de los equipos, que hace que el impacto de infraestructura se dispare y que el proceso demande energía de la red.
- Mercado D, debido al sobredimensionamiento de las estructuras, aunque mejor que el mercado A ya que el proceso sí es autosuficiente.
- Mercados N y D, debido al infra dimensionamiento de la infraestructura con respecto al volumen de residuos tratado, haciendo que el proceso sea dependiente de la red eléctrica.
- Mercados H y S, cuya mezcla de residuos sólo contiene verdura, y debido a un ligero sobredimensionamiento.

En los 17 casos restantes, se obtiene una media de ahorro de 55% de los impactos del fertilizante convencional, demostrando así que el biofertilizante es una alternativa más sostenible de para aportar nutrientes a los suelos en la agricultura.

### 5.1. Futuras mejoras del modelo

El modelo de proceso productivo de biofertilizante utilizado en este estudio no deja de ser una primera aproximación a la evaluación de los biofertilizantes como sustituto de fertilizantes inorgánicos en un contexto similar. A lo largo de la simulación y análisis de resultados, se han encontrado una serie de limitaciones del modelo que, si bien permiten la escalabilidad de éste, afectan a la precisión de los resultados que proporciona. A continuación, se listan las mejoras a incorporar en una segunda iteración del modelo de proceso:

- Realizar un dimensionamiento a medida para cada caso con el fin de obtener un porcentaje de impacto atribuido a la infraestructura constante para todos los mercados.
- Mejorar el modelo de emisiones de proceso de compost empleado para que contemple el tipo de sustrato y así observar la variación de impactos de eutrofización y acidificación en función del residuo digerido.
- Ampliar los límites del sistema a la aplicación en suelos para observar el impacto total del biofertilizante.

## 6. Referencias

- [1] Morales Polo, C. “Solid waste management course notes on anaerobic digestion”. Enero 2023.
- [2] S. Mercados Centrales de Abastecimiento, “Mercasa informe anual 2021”, <https://www.mercasa.es/publicaciones/informes-anuales/>.
- [3] Manu, M. “A review on nitrogen dynamics and mitigation strategies of food waste composting”, *Bioresource Technology*, vol 334, 2021.
- [4] Morales Polo, C. Cledera Castro, M.d.M. Hueso Kortelaas, K. Revuelta Aramburu, M. “Anaerobic digestion in wastewater reactors of separated organic fractions from wholesale markets waste. Compositional and batch characterisation, energy, and environmental feasibility”, *Science of the Total Environment*, vol. 726, 2020.

- [5] Bakkaloglu, S. Lowry, D. Fisher, R. Frand, J. “Quantification of methane emissions from UK biogas plants”, *Waste Management*, vol. 124, 2021.

# FROM WASTE TO FERTILISERS: INTEGRATION IN SUSTAINABILITY AND CIRCULAR ECONOMY

**Author: Martín-Sanz Garrido, Carmen.**

Supervisor: Revuelta Aramburu, Marta. Morales Polo, Carlos.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## ABSTRACT

A life cycle analysis (LCA) has been carried out to assess the integration digestate biofertilizer into the concepts of sustainability and circular economy by comparing the obtained results to those of already in use inorganic fertilisers. This study has been carried out under a national scope, as it analyses the digestates produced by anaerobically digesting the real organic waste produced in 23 of Spain's food markets.

**Keyword:** Organic fertilisers; LCA; Circular economy; Mercasa; Sustainability; Anaerobic digestion; organic waste

## 1. Introduction

The European Union is currently in the midst of searching for and developing renewable energy sources to replace the fossil resources used to date, as well as struggling with the increasing amount of waste generated by its populations. In this context, anaerobic digestion presents an opportunity not only for energy transition, but also for the development of local economies and progress in the implementation of the concept of circular economy in society.

Another advantage of anaerobic digestion is that it produces a waste product called digestate, an organic sludge rich in nutrients. This digestate contains the same nutrients that enter the digester, making it a very rich organic fertiliser, the use of which reduces the need for chemical fertilisers and promotes soil sustainability.

It is precisely this last aspect of A.D. that motivates this study: the use of digestate as a vehicle of circular economy through its application as a biofertilizer. This concept is not new, however, few studies have focused on the comparison of environmental impacts between common (inorganic) fertilisers and those derived from digestate, as well as the savings in raw materials and fossil resources that replacing fertilisers with digestate entails.

Throughout this study, the production process of the biofertilizer derived from digestate will be analysed in depth to carry out a Life Cycle Assessment (LCA) of the same and compare it with LCAs of NPK type inorganic fertilisers (those used in most current crops). As the properties and environmental impacts of digestate depend mainly on the type of waste treated in the D.A., and to be able to use relevant data for the Spanish industry, separate LCAs will be carried out for the specific quantity and composition of the different organic wastes generated in each Food Market in Spain.

## 2. Project definition

The final objective of this project is to quantify the level of integration in the circular economy of the use of digestate as a biofertilizer for agricultural crops, thus replacing the fertilizers currently used. In order to quantify it, a Life Cycle Analysis (LCA) of the digestate as a biofertilizer will be carried out, from organic waste generated at the biggest food markets of the country. To achieve this objective, certain previous steps must be fulfilled according to the following order:

- Establish scope and goal LCA to be carried out: system boundaries, functional unit and impacts to be analysed. These are the fundamental parameters that limit the scope of the study both upstream and downstream of organic fertilizer production, as well as the magnitude and unit to which all the results of the study will refer. It is also very important to define what environmental impacts are going to be analysed, to ensure that the correct information is provided to the LCI (life cycle inventory).
- Elaboration of the LCI: consists of determining all the processes to be taken into account in the impact inventory, as well as all the raw materials, products, by-products and their residues. For this phase it will also be necessary to analyse the waste entering the digester in each market (its quantity and composition), as these will determine the quality of the digestate and, consequently, the quality of the biofertilizer.
- Life cycle impact assessment (LCIA). Once the inventory has been completed, the LCA results are obtained through the CML method. These results will first be analysed separately at the different stages of the process to adjust the model if necessary. Subsequently, the results obtained for different markets will be compared to analyse the impact of the quality (organic waste mixture) of the waste at the digester inlet.
- Sustainability inclusion analysis. The results obtained for the 23 biofertilizers in the food markets are compared with inorganic fertilisers of the same composition, to quantify the savings in environmental impacts of using biofertilizer instead of inorganic fertiliser.

### **3. System modelling**

In the first step of this section, the scope and goal of the LCA will be detailed, followed by the elaboration of the inventory of the life cycle analysis of the biofertilizer.

#### **3.1. Goal and scope of the LCA**

The goal of this LCA is to obtain the environmental impacts of organic fertiliser production from anaerobic digestate digestion. The scope of this LCA encompasses digestate originating from different waste mixtures and in different amounts, in order to also analyse the variability of the results depending on the substrates used in the anaerobic digestion step.

##### **3.1.1. Function and Functional Unit**

The LCA to be carried out in this project is an attributional LCA, i.e., it will try to represent the biofertilizer process in isolation from the rest of the economy and establish clear limits beyond which its impacts are no longer taken into account.

The functional unit of an LCA is the measurable quantity of product for which the impacts of the inventory are to be accounted. In this project, the functional unit will be 1 kg of biofertilizer produced from digestate.

### 3.1.2. System boundaries

As explained above, the system boundaries represent the points beyond which the impacts of the process are no longer considered. The system boundaries are illustrated in the Figure 1, and detailed in the following points:

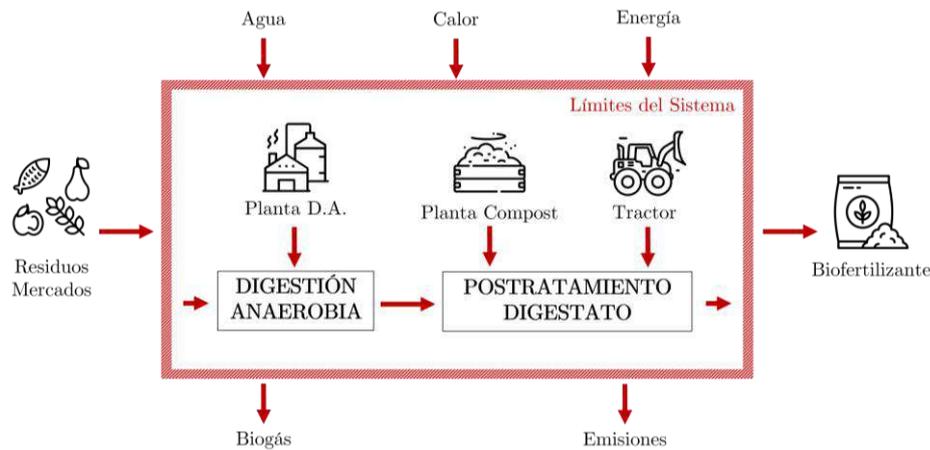


Figure 1 – Boundaries of the proposed LCA

- This LCA aims to analyse the impacts to produce the biofertilizer. Therefore, only digester operation flows will be considered, and recharge activities (digester cleaning and micro-organism substrate recharge) will be disregarded.
- For the biofertilizer process, the system boundaries are upstream, the input of organic waste to the digester, and downstream, the production of biofertilizers. The objective of this study is to compare the production impacts of biofertilizer and common inorganic fertiliser, so the life cycle analysis inventory ends with the production of these products, and the impact of these products after their application will not be analysed.
- Regarding the infrastructure used during the process, the anaerobic digestion plant and digester and the composting plant will be considered. To inventory the impacts corresponding to the infrastructure per kg of biofertilizer produced, its total construction impacts will have to be counted and divided by the amount of waste treated over its lifetime.
- No transport of organic waste from the food market to the digester will be envisaged, as the digester is assumed to be on the market's own premises. The digestate will not be transported for post-treatment either, as this will be done on site.
- Only air emissions from the AD and posttreatment processes will be considered in this study. At all times it is assumed that anaerobic digestion of waste and post-treatment of digestate is carried out in approved plants with soil leakage prevention devices and wastewater treatment equipment, which prevent any emission of pollutants to soil and local waters.

### 3.2. Life Cycle Inventory Assessment (LCIA)

The inventory of an LCA is where all the processes that are necessary for the elaboration of the functional unit, and that are included within the limits of the system, are compiled. Below, Figure 2 shows the structure of the inventory established for this study, according to the levels of importance of the production flows of the processes involved in obtaining the biofertilizer.

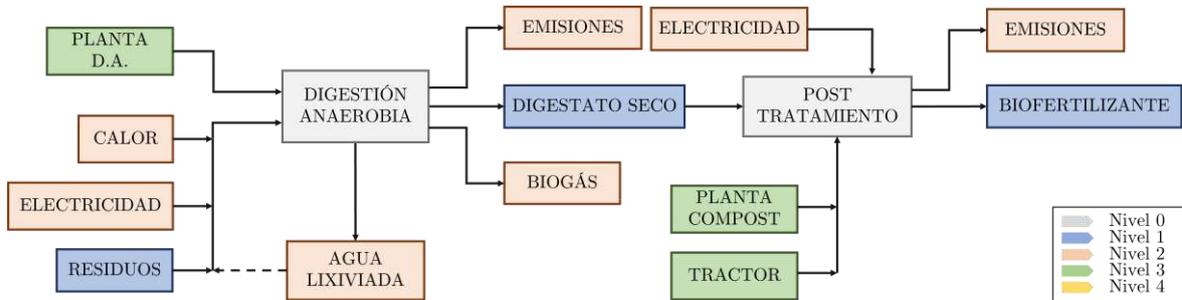


Figure 2 – Life Cycle Inventory Structure

To simplify the identification of unit flows, the inventory of the LCA has been divided into two main processes: anaerobic digestion of organic waste and post-treatment of digestate. The flows attributed to each process are explained below:

#### 3.2.1. Anaerobic Digestion

Anaerobic digestion is a biological process in which microorganisms break down incoming organic matter in the absence of oxygen, consisting of 4 main stages: hydrolysis, acetogenesis, acidogenesis and methanogenesis [1]. After this process, the incoming organic waste is transformed into hydrogen, methane, and carbon dioxide, accompanied by digestate: the stabilised solid and liquid matter that could not be transformed into biogas. The process flows considered for the LCA inventory are as follows (a brief explanation of each flow is given below, and concrete quantities and qualities of each are analysed in the study for each of the 23 cases treated):

- Organic waste issued from the food markets. These wastes vary in quantity and composition (percentage of meat, fish, fruit and vegetables) depending on the market in question [2].
- Additional water to control the pH of the process. This water is necessary to optimise the biogas production of the process and comes from a recirculation of the liquid fraction of the digestate leaving the process [3].
- Process infrastructure. A standard digester is taken for all 23 cases, and whose environmental impact on the biofertilizer corresponds to the amortisation of the total infrastructure corresponding to each kg of digestate produced.
- Heat and electricity provided to the process. For each market, the amount of biogas produced and the heat and electricity needs necessary to supply the process are calculated according to the assumptions made in [4]. It is also determined what percentage of these needs can be supplied by the biogas from the process, thus avoiding the consumption of electricity and gas from the grid.

- Produced biogas in the digester. The assumptions of [4] are used for each case to obtain the biogas and biomethane obtained in the digester. This amount produced is then compared with the energy needs to assess the self-sufficiency of the process and the amount of biogas fed into the grid.
- Digestate exiting the digester, whose composition and quantity depends on the waste entering the digester [4].
- Air emissions of the AD process. The process used is considered to recover all gases leaving the digester for use as biogas. However, any biogas leakage from the process at all stages is considered as emissions, for which the quantities given in [5] have been used.

### 3.2.2. Post treatment: composting

The digestate resulting from AD has considerable moisture content and is not yet in optimal condition for use in soils, so it is subjected to a composting process: a biological, aerial and controlled technique of stabilisation and treatment of biodegradable organic waste, both solid and semi-solid. As with the AD process, the following process flows have been tailor-made for each of the 23 cases studied.

- Digestate exiting the AD process, whose composition depends on the treated waste, and from which 60% ([3]) of its initial moisture has been removed for recirculation to the process.
- Process infrastructure. As with A.D., the amortization of the plant per kg of biofertilizer produced is used.
- Use and amortisation of digestate aeration machinery (tractor/shovel). In composting, it is necessary to stir the substrate frequently to provide oxygen to the micro-organisms in the process. This aeration is carried out with a diesel-powered mechanical shovel, the amortisation, and emissions of which depend on the amount of digestate treated.
- Operation electricity at composting plant, which is set according to the mass of digestate treated.
- Air emissions. The atmospheric emissions produced by composting per amount of digestate treated have been established. Since composting is generally carried out in open facilities, all these generated emissions are emitted into the atmosphere.
- Biofertilizer produced after composting. For each market, a mass balance of the composting process has been carried out, thus obtaining the amount and composition of the resulting biofertilizer.

Once the quantities and qualities of each process flow have been detailed according to the market to be analysed, the life cycle inventory has been built in Simapro, according to the structure presented in Figure 2.

## 4. Results

Once the inventory of the LCA has been constructed, the impacts associated with it have been calculated according to the CML method. The CML method, a methodology created by the Institute of Environmental Sciences of the University of Leiden in 1992, quantifies

the environmental impact of processes in 11 impact categories: depletion of abiotic resources, depletion of fossil resources, contribution to climate change, ozone layer depletion, human, marine, freshwater and terrestrial toxicity, photochemical oxidation, acidification and eutrophication.

The results of the study contain, in a first phase, the quantification of the 11 impact categories for the 23 cases studied, followed by a sensitivity analysis of the of the infrastructure dimensioning impact. In a second phase, and with the aim of evaluating the sustainability of the biofertilizers, the results are compared with those of LCA of inorganic fertilizers of the same composition.

#### 4.1. General results for each impact category

After obtaining the raw results for each of the 23 cases, a comparison by impact category has been made to assess how the differences between organic waste qualities and quantities affect the results. Figure 3 represents the results obtained for the category of contribution to global warming potential, measured in CO<sub>2</sub> equivalent emissions (the analysis of the other 9 impact categories is shown in the study).

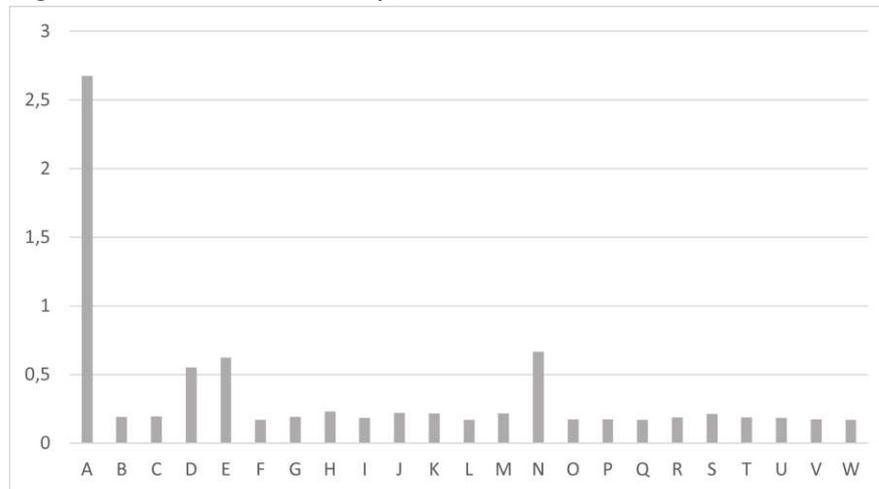


Figure 3 – Results for global warming potential (kg CO<sub>2</sub> eq.) for all food markets

As can be seen in Figure 3, there are 4 different levels of results, which depend mainly on the amount of organic waste and the design of the infrastructure used in the study, and which are repeated for the other impact categories.

According to Figure 3, the global warming potential of market A is up to 11 times higher than that of the other markets. This result is due to an oversizing of the anaerobic digestion infrastructure, causing a higher infrastructure amortization impact per kg of biofertilizer produced. The same phenomenon, although on a smaller scale, occurs in market B, which also shows anomalous results.

Also noteworthy is the impact of the undersizing of infrastructure that occurs in markets E and N, which, due to the large influx of waste from food markets, does not generate enough biogas for anaerobic digestion to be self-sufficient. A priori, they present a lower proportional impact of infrastructure, which would have given a better result. However, the impacts derived from the fossil proportion of the national electricity mix contribute an equivalent CO<sub>2</sub> that triples the results of the other markets.

At a lower level we can find the remaining 19 cases, which present the same results except for small differences in sizing.

#### 4.2. Sensitivity of the results to Infrastructure sizing

In view of the impact on the results observed due to the over- or undersizing of infrastructure, a sensitivity analysis of the results obtained for the 11 impact categories has been carried out, analysing the results obtained if the infrastructure is excluded from the processes, and the impact per impact category that these have in each of the 23 cases.

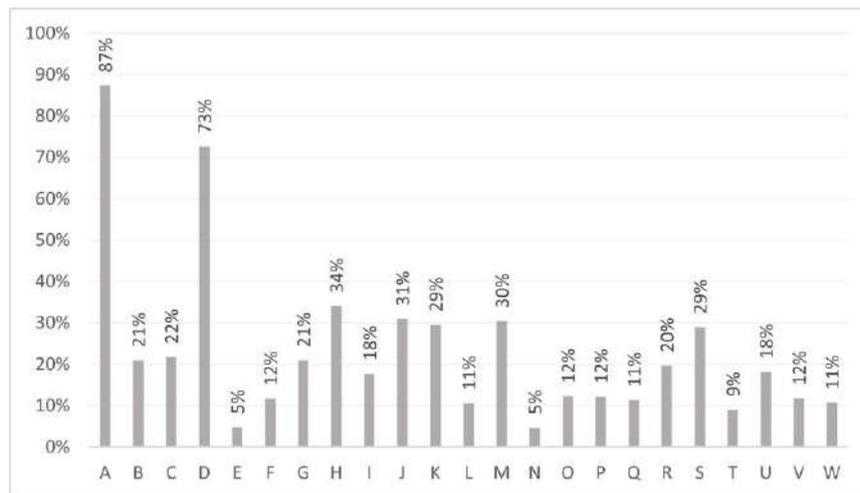


Figure 4 – Percentage of results derived from the infrastructure for global warming potential (kg CO<sub>2</sub> eq.)

Figure 4 clearly shows the effects of infrastructure in the category of global warming potential, where it can be clearly seen that infrastructure alone makes up almost the total impact obtained for markets A and D and only 5% for markets E and N. This phenomenon occurs, albeit at different scales, in the rest of the impact categories studied.

#### 4.3. Comparison of the results of biofertilizer LCA to inorganic fertilizers

In order to be able to fairly compare the biofertilizer with the commercial fertilisers generally used in agriculture, and thus to be able to evaluate them as a sustainable alternative, it is necessary that they have the same composition (as a difference in composition can result in a substantial difference in the results of the LCA). For this reason, each biofertilizer will be compared with an NPK fertiliser (containing nitrogen, phosphorus, and potassium) of the same composition.

It is important to note that these inorganic fertilisers have tailor-made compositions to compare them correctly with the biofertilizer on the markets, but none of them has an inorganic fertiliser composition that is common in agriculture. In the future, if to obtain a biofertilizer composition to replace common fertilisers, it will be necessary to vary the percentages of each substrate at the input of the AD process.

Four of the studied markets will be analysed as representative cases. For each of them, the impact of the inorganic fertiliser on the impact of the biofertilizer will be analysed so that, if a score higher than 100% is obtained, the biofertilizer has a lower impact than the commercial (inorganic) fertilizer.

- Market A:** This case represents the phenomenon of infrastructure oversizing that has been observed in the analysis by impact categories, as well as being one of the markets that is not self-sufficient in the anaerobic digestion process. In Figure 5 shows that the commercial fertiliser outperforms the biofertilizer in all impact categories of the CML method, concluding that biofertilizer is, in this case, less sustainable than a common inorganic fertilizer.

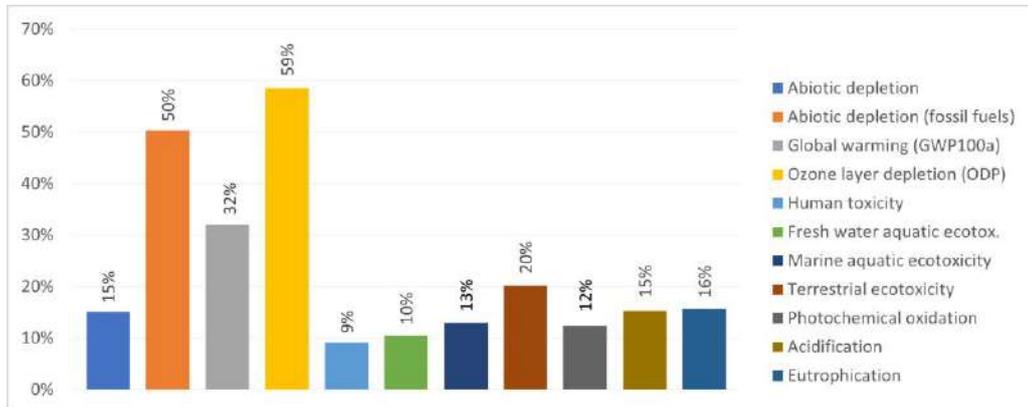


Figure 5 – Results comparison for biofertilizer and inorganic fertilizer for market A

- Market D:** This market again has a much larger infrastructure than necessary, although, in this case, the volume of waste it treats is sufficient to generate the heat required by the digester, so it does not require energy from the electricity grid. By being self-sufficient, the results obtained are considerably improved (Figure 6), resulting in a biofertilizer that is competitive in the categories of fossil fuel depletion and ozone layer destruction.
- Market G:** This case is the standard case, as it represents the remaining 19 markets in that it does not present problems of over-sizing or self-sufficiency, as well as using varied organic waste at the origin of the production process. This is the best possible case, as it reproduces the real conditions of a digestate biofertilizer coming from an AD plant correctly dimensioned for the incoming volume of waste, thus allowing a comparison on equal terms with the inorganic fertilizer. Figure 7 shows how biofertilizer improves the results of organic fertiliser in 9 of the 11 impact categories analysed and, in many of them, being up to several times more sustainable (exceeding 100% impact reduction).

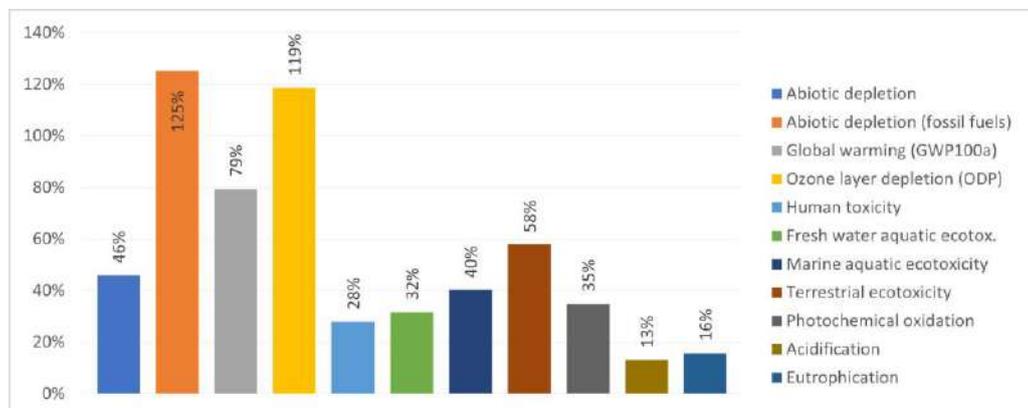


Figure 6 - Results comparison for biofertilizer and inorganic fertilizer for market D

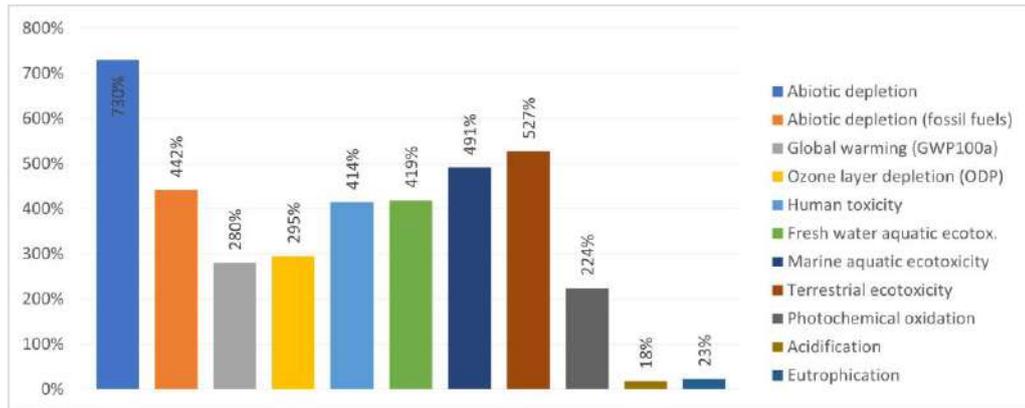


Figure 7 - Results comparison for biofertilizer and inorganic fertilizer for market G

- Market N:** Market N, as well as market E, presents the opposite case to market A: an undersizing of the infrastructure. This market generates too much waste for the established digester size, so not enough biogas is generated for the high energy demand of the digester. A priori, this undersizing should improve the results with respect to the typical case (as can be seen in the large natural resource depletion result), as the impact of the infrastructure per kg of biofertiliser is considerably reduced, but the energy required from the grid adds to the impacts of the national energy mix, increasing the results for all categories. It is for this reason that Figure 8 has an average result: better than market A, but not reaching the 9 improved categories of the typical case.

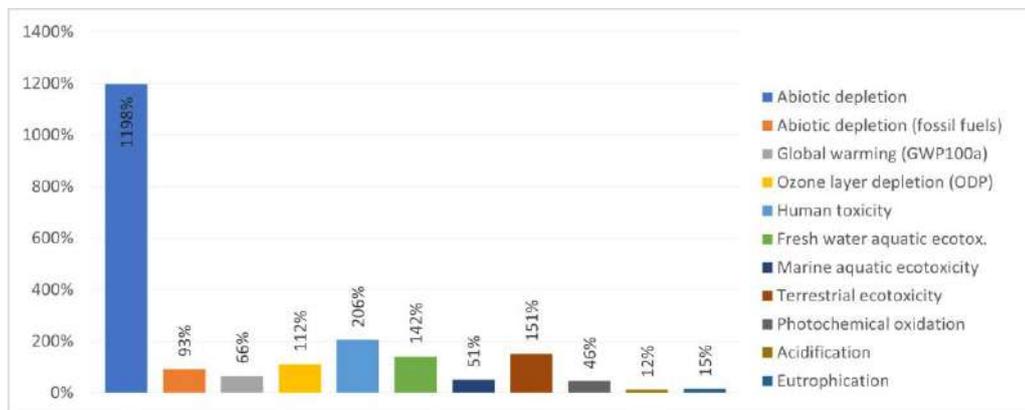


Figure 8 - Results comparison for biofertilizer and inorganic fertilizer for market N

## 5. Conclusions

Throughout the study, the construction of the biofertilizer production model has been detailed, as well as its environmental evaluation compared to the current alternative: inorganic fertilisers. For this purpose, inorganic fertilisers of the same composition as the biofertilizer obtained for each of the 23 markets studied through a process of anaerobic digestion and standardised compost have been chosen.

The results of this comparison vary substantially depending on the volume and composition of waste in each case, as well as the environmental category in which the comparison is made. To be able to definitively compare the results obtained for fertiliser and biofertilizer (and thus determine which of them is better, environmentally speaking), the scores for each

of the categories have been converted to unit values, thus obtaining an aggregated total score for each product. Figure 9 below shows for each market the percentage savings in environmental impacts of biofertilizers compared to fertiliser.



Figure 9 - Unit comparison between fertiliser and bio-fertiliser for the 23 markets

17 out of the 23 cases studied lead to a reduction of the total environmental impacts of their comparator fertiliser. The following cases stand out negatively:

- Market A, due to the oversizing of the equipment, which makes the impact of infrastructure sizing, and the process' energy demand from the grid.
- Market D, due to the oversizing of the infrastructures, although better than market A as the process is self-sufficient.
- Markets N and E, due to the undersizing of the infrastructure in relation to the volume of waste treated, making the process dependent on the electricity from the grid.
- Markets H and S, whose waste mixture contains only vegetables, and due to slight infrastructure oversizing.

In the remaining 17 cases, an average saving of 55% of the impacts of conventional fertiliser is obtained, thus demonstrating that biofertilizer is a more sustainable alternative for providing nutrients to soils in agriculture, as well as being an effective method of recovering a by-product (digestate) of an AD process that already recovers waste from various food markets.

### 5.1. Future improvements

The biofertilizers production process model used in this study is a first approximation to the evaluation of biofertilizers as a substitute for inorganic fertilisers. Throughout the simulation and analysis of the results, a series of limitations of the model have been found which, although they allow its scalability, affect the accuracy of the results it provides. The improvements to be incorporated in a second iteration of the process model are listed below:

- Carry out a tailor-made infrastructure sizing for each case to obtain a constant percentage of impact attributed to the infrastructure for all markets.

- Improve the composting process emissions model used to consider the type of substrate and thus observe the variation of eutrophication and acidification impacts depending on the digested waste.
- Extend the limits of the system to soil application to observe the full impact of the biofertiliser

## 6. Bibliography

- [1] Morales Polo, C. “Solid waste management course notes on anaerobic digestion”. Enero 2023.
- [2] S. Mercados Centrales de Abastecimiento, “Mercasa informe anual 2021”, <https://www.mercasa.es/publicaciones/informes-anuales/>.
- [3] Manu, M. “A review on nitrogen dynamics and mitigation strategies of food waste composting”, *Bioresource Technology*, vol 334, 2021.
- [4] Morales Polo, C. Cledera Castro, M.d.M. Hueso Kortelaas, K. Revuelta Aramburu, M. “Anaerobic digestion in wastewater reactors of separated organic fractions from wholesale markets waste. Compositional and batch characterisation, energy, and environmental feasibility”, *Science of the Total Environment*, vol. 726, 2020.
- [5] Bakkaloglu, S. Lowry, D. Fisher, R. Frand, J. “Quantification of methane emissions from UK biogas plants”, *Waste Management*, vol. 124, 2021.



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

ICADE

CIHS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

# **Fertilizantes a partir de residuos: Integración en la economía circular y en la sostenibilidad**

Autor

Carmen Martín-Sanz Garrido

Directores

Marta Revuelta Aramburu

Carlos Morales Polo

Madrid

Julio 2023

# Introducción

Actualmente, la Unión Europea se encuentra en plena búsqueda y desarrollo de fuentes de energía renovable que sustituyan a los recursos fósiles utilizados hasta la fecha, además de luchar con la creciente cantidad de residuos que generan sus poblaciones. En este contexto, la digestión anaerobia presenta una oportunidad no sólo de transición energética, sino también de desarrollo de economías locales y de avance en la implantación del concepto de economía circular en la sociedad.

La digestión anaerobia (DA) es una tecnología que usa microorganismos para descomponer materia orgánica en ausencia de oxígeno. En el digestor, la materia orgánica se descompone en componentes más simples (ácidos grasos y gas metano), que se combinan para formar biogás. Este biogás, a su vez, puede ser utilizado como una fuente de energía renovable, ya sea directamente para la producción de calor o electricidad, o como combustible para vehículos. Además, la digestión anaerobia es una tecnología sostenible porque utiliza residuos biológicos de origen animal, agrícola, industrial o municipal como materia prima, reduciendo así la cantidad de residuos que se envían a vertederos y la emisión de gases de efecto invernadero asociados a su descomposición. Otra ventaja de la digestión anaerobia es que produce un residuo llamado digestato, un lodo orgánico rico en nutrientes. La ventaja es que el digestato contiene exactamente los mismos nutrientes que entran al digestor, lo que lo convierte en un fertilizante orgánico muy rico, y cuyo uso reduce la necesidad de fertilizantes químicos y promueve la sostenibilidad del suelo.

Es precisamente esta última faceta de la DA la que motiva este estudio: la utilización del digestato como vehículo de economía circular mediante su aplicación como biofertilizante. Este concepto no es nuevo, ya que las primeras aplicaciones del digestato como fertilizante en Europa datan de 1980, y los primeros estudios que evalúan su efectividad en los suelos agrícolas aparecen al principio de la década de los 2000. Sin embargo, pocos estudios se han centrado en la comparación de impactos ambientales entre los fertilizantes comunes (inorgánicos) y los derivados del digestato, así como el ahorro de materias primas y recursos fósiles que supone sustituir los fertilizantes por el digestato.

A lo largo de este estudio, se analizará en profundidad el proceso de producción del biofertilizante derivado del digestato para poder realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del mismo, y compararlo con ACVs de fertilizantes inorgánicos tipo NPK (los utilizados en la mayoría de cultivos actuales). Como las propiedades e impactos ambientales del digestato dependen fundamentalmente del tipo de residuo tratado en la DA, y con el fin de poder emplear datos relevantes para la industria española, se realizarán ACV separados para la cantidad y composición concreta de los residuos orgánicos generados en

cada Mercado de Abastos de España (Figura 1).



Figura 1: Distribución de los mercados de abastos cuyos residuos serán objeto del estudio

El estudio de los 23 mercados por separado permitirá comparar la diferencia en los resultados según la cantidad y el tipo de residuo que entre al digestor, al producir cada uno un fertilizante orgánico de composición única. La composición del fertilizante orgánico está directamente relacionada con la mezcla específica de residuos que se utiliza en el proceso de digestión. Al analizar estos mercados de manera individual, se podrán identificar los efectos de la mezcla de residuos y la cantidad de éstos en los resultados ambientales, permitiendo así identificar una combinación óptima para maximizar la sostenibilidad del biofertilizante obtenido.

# Índice general

Capítulos	Página
<b>1. Objetivos y Metodología</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos del proyecto	1
1.2. Recursos a Emplear	2
<b>2. Estado de la cuestión</b>	<b>3</b>
2.1. El análisis de ciclo de vida como herramienta para la evaluación de impactos ambientales	3
2.2. Economía circular: principios y el rol de la digestión anaerobia	4
2.3. Digestión anaerobia	5
2.3.1. Variedad de sustratos y el potencial de la codigestión	5
2.4. Post tratamientos del digestato para su uso como fertilizante	6
2.5. Los fertilizantes inorgánicos y sus componentes	7
2.6. Uso del digestato como biofertilizante: historia y legislación	9
<b>3. Objetivo y alcance del análisis de ciclo de vida</b>	<b>10</b>
3.1. Función y Unidad Funcional	10
3.2. Límites del sistema	10
3.3. Impactos a analizar	11
<b>4. Elaboración del inventario del análisis de ciclo de vida del biofertilizante</b>	<b>14</b>
4.1. Proceso de Digestión Anaerobia	15
4.1.1. Entradas de la Naturaleza	16
4.1.2. Entradas de la Tecnosfera: Materiales y Combustibles	16
4.1.2.1. Residuos Orgánicos de las Mercas	16
4.1.2.2. Agua	17
4.1.2.3. Sustrato	18
4.1.2.4. Aditivos	18
4.1.2.5. Infraestructura	18
4.1.3. Entradas de la Tecnosfera: Electricidad y Calor	19
4.1.3.1. Calor	19
4.1.3.2. Electricidad	21
4.1.4. Salidas a la Tecnosfera	22
4.1.4.1. Biogás	22
4.1.4.2. Digestato	27
4.1.5. Emisiones	30
4.1.6. Residuos	31

4.1.6.1. Residuos sólidos	31
4.2. Proceso de Post-tratamiento del Digestato	32
4.2.1. Entradas de la Naturaleza	33
4.2.2. Entradas de la Tecnosfera: Materiales y Combustibles	33
4.2.2.1. Digestato	33
4.2.2.2. Planta de Compostaje	33
4.2.2.3. Tractor	34
4.2.3. Entradas de la Tecnosfera: Electricidad y Calor	35
4.2.3.1. Electricidad	35
4.2.4. Salidas a la Tecnosfera	35
4.2.4.1. Biofertilizante	35
4.2.5. Emisiones	35
4.3. Construcción del Inventario en Simapro	38
4.3.1. Digestión Anaerobia	38
4.3.1.1. Asignación de Impactos	38
4.3.2. Inserción de los residuos vegetales (fruta y verdura)	39
4.3.3. Compost	39
<b>5. Resultados obtenidos</b>	<b>43</b>
5.1. Resultados globales por categoría de impacto	43
5.1.1. Agotamiento de recursos naturales (Abiotic Depletion)	43
5.1.1.1. Análisis excluyendo la infraestructura	44
5.1.2. Agotamiento de combustibles fósiles (Abiotic Depletion: Fossil Fuels)	45
5.1.2.1. Análisis excluyendo la infraestructura	46
5.1.3. Potencial de calentamiento global (Global Warming Potential)	47
5.1.3.1. Análisis excluyendo la infraestructura	47
5.1.4. Destrucción de la capa de ozono (Ozone Layer Depletion)	48
5.1.4.1. Análisis excluyendo la infraestructura	49
5.1.5. Toxicidad humana (Human Toxicity)	50
5.1.5.1. Análisis excluyendo la infraestructura	50
5.1.6. Toxicidad del medio acuático (Aquatic Ecotoxicity)	51
5.1.6.1. Análisis excluyendo la infraestructura	52
5.1.7. Toxicidad del medio terrestre (Terrestrial Ecotoxicity)	52
5.1.7.1. Análisis excluyendo la infraestructura	52
5.1.8. Oxidación fotoquímica (Photochemical Oxidation)	54
5.1.8.1. Análisis excluyendo la infraestructura	54
5.1.9. Acidificación (Acidification)	55
5.1.9.1. Análisis excluyendo la infraestructura	56
5.1.10. Eutrofización (Eutrophication)	57
5.1.10.1. Análisis Excluyendo la Infraestructura	57
5.2. Análisis de ciclo de vida de los fertilizantes comerciales	58
5.2.1. Comparación de impactos entre el fertilizante inorgánico y el bio- fertilizante	60

5.2.1.1. Mercado A	60
5.2.1.2. Mercado D	61
5.2.1.3. Caso G: Córdoba.	61
5.2.1.4. Mercado N	62
<b>6. Conclusiones</b>	<b>64</b>
6.1. Futuras mejoras del modelo	65
6.1.1. Dimensionamiento de la infraestructura de acuerdo con el volumen de residuos tratados	65
6.1.2. Influencia del tipo de sustrato y el impacto de la co-digestión en el ahorro de impactos	65
6.1.3. Mejora en la definición de las emisiones de los procesos productivos	66
6.1.4. Ampliación de los límites del sistema para incluir la aplicación del biofertilizante al terreno	66
<b>Bibliografía</b>	<b>70</b>
<b>A. Alineación con los ODS</b>	<b>1</b>
<b>B. Resultados Brutos del Análisis de Ciclo de Vida</b>	<b>4</b>
B.1. Resultados del A.C.V. teniendo en cuenta la infraestructura	4
B.2. Resultados del A.C.V. excluyendo la infraestructura	12
B.3. Resultados del A.C.V. de los fertilizantes inorgánicos	21
<b>C. Impacto de la infraestructura de los procesos en los resultados finales</b>	<b>24</b>
<b>D. Resultados de fertilizantes inorgánicos por categoría de impacto</b>	<b>30</b>
<b>E. Comparación de impactos entre el fertilizante inorgánico y el biofertilizante para el resto de mercados</b>	<b>35</b>

# Índice de figuras

1. Distribución de los mercados de abastos cuyos residuos serán objeto del estudio . . . . .	II
<b>Figura</b>	<b>Página</b>
<hr/>	
2.1. Consumo global de fertilizantes inorgánicos en 2020. Fuente: [1] . . . . .	8
3.1. Alcance del inventario del análisis de ciclo de vida . . . . .	11
4.1. Niveles del inventario del ACV . . . . .	15
4.2. Proceso de Digestión Anaerobia [2] . . . . .	16
4.3. Niveles del inventario del ACV . . . . .	38
4.4. Proceso Digestato X en SimaPro . . . . .	41
4.5. Proceso Biofertilizante X en SimaPro . . . . .	42
5.1. Comparación de resultados de agotamiento de recursos naturales (kg Sb eq.) para todos los mercados . . . . .	44
5.2. Resultados del agotamiento de recursos naturales (kg Sb eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados . . . . .	44
5.3. Comparación de resultados de agotamiento de combustibles fósiles (MJ) para todos los mercados . . . . .	45
5.4. Resultados del agotamiento de combustibles fósiles (MJ) excluyendo la infraestructura para todos los mercados . . . . .	46
5.5. Comparación de resultados del potencial de calentamiento global (kg de CO <sub>2</sub> eq.) para todos los mercados . . . . .	47
5.6. Resultados del potencial de calentamiento global (kg de CO <sub>2</sub> eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados . . . . .	48
5.7. Comparación de resultados de capacidad de destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq.) para todos los mercados . . . . .	48
5.8. Resultados de destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados . . . . .	49
5.9. Comparación de resultados de toxicidad humana (kg 1,4-DCB eq.) para todos los mercados . . . . .	50
5.10. Resultados de toxicidad humana (kg 1,4-DCB eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados . . . . .	51
5.11. Comparación de resultados de toxicidad del medio acuático (kg 1,4-DCB eq.) para todos los mercados . . . . .	51
5.12. Resultados de toxicidad del medio acuático (kg 1,4-DCB eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados . . . . .	52

5.13. Comparación de resultados de toxicidad del medio terrestre (kg 1,4-DCB eq.) para todos los mercados . . . . .	53
5.14. Resultados de toxicidad del medio terrestre (kg 1,4-DCB eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados . . . . .	53
5.15. Comparación de resultados de oxidación fotoquímica (kg de $C_2H_4$ eq.) para todos los mercados . . . . .	54
5.16. Resultados de oxidación fotoquímica (kg de $C_2H_4$ eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados . . . . .	55
5.17. Comparación de resultados de acidificación (kg $SO_2$ eq.) para todos los mercados . . . . .	56
5.18. Resultados de acidificación (kg $SO_2$ eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados . . . . .	56
5.19. Comparación de resultados de eutrofización (kg $PO_4$ eq.) para todos los mercados . . . . .	57
5.20. Resultados de eutrofización (kg $PO_4$ eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados . . . . .	58
5.21. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado A . . . . .	61
5.22. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado D . . . . .	62
5.23. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado G . . . . .	62
5.24. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado N . . . . .	63
6.1. Comparación unitaria entre fertilizante y biofertilizante . . . . .	67
C.1. Impacto de la infraestructura sobre los resultados de agotamiento de recursos naturales (kg Sb eq.) . . . . .	24
C.2. Impacto de la infraestructura sobre los resultados de agotamiento de combustibles fósiles (MJ) . . . . .	25
C.3. Impacto de la infraestructura sobre los resultados de contribución al calentamiento global (kg $CO_2$ eq.) . . . . .	25
C.4. Impacto de la infraestructura en los resultados de destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq.) . . . . .	26
C.5. Impacto de la infraestructura en los resultados de toxicidad humana (kg DCB-1,4 eq.) . . . . .	26
C.6. Impacto da la infraestructura en los resultados de toxicidad del medio acuático (kg DCB-1,4 eq.) . . . . .	27
C.7. Impacto da la infraestructura en los resultados de toxicidad del medio terrestre (kg DCB-1,4 eq.) . . . . .	27
C.8. Impacto da la infraestructura en los resultados oxidación fotoquímica (kg $C_2H_4$ eq.) . . . . .	28

C.9. Impacto da la infraestructura en los resultados de acidificación (kg $SO_2$ eq.)	28
C.10. Impacto da la infraestructura en los resultados de eutrofización (kg $PO_4$ eq.)	29
D.1. Agotamiento de recursos naturales (kg Sb eq.) de los fertilizantes inorgánicos	30
D.2. Agotamiento de recursos fósiles (MJ) de los fertilizantes inorgánicos	30
D.3. Resultados de potencial de calentamiento global (kg $CO_2$ eq.) de los fertilizantes inorgánicos	31
D.4. Resultados de destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq.) de los fertilizantes inorgánicos	31
D.5. Resultados de toxicidad en humanos (kg DCB-1,4 eq.) de los fertilizantes inorgánicos	32
D.6. Resultados de toxicidad del medio acuático (kg DCB-1,4 eq.) de los fertilizantes inorgánicos	32
D.7. Resultados de toxicidad del medio terrestre (kg DCB-1,4 eq.) de los fertilizantes inorgánicos	33
D.8. Resultados de oxidación fotoquímica (kg $C_2H_4$ eq.) de los fertilizantes inorgánicos	33
D.9. Resultados de acidificación (kg $SO_2$ eq.) de los fertilizantes inorgánicos	34
D.10. Resultados de eutrofización (kg $PO_4$ eq.) de los fertilizantes inorgánicos	34
E.1. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado B	35
E.2. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado C	36
E.3. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado E	36
E.4. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado F	37
E.5. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado H	37
E.6. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado I	38
E.7. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado J	38
E.8. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado K	39
E.9. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado L	39
E.10. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado M	40
E.11. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado O	40

E.12. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado P	41
E.13. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado Q	41
E.14. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado R	42
E.15. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado S	42
E.16. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado T	43
E.17. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado U	43
E.18. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado V	44
E.19. Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado W	44

# Índice de Tablas

Tabla	Página
4.1. Residuos alimentarios orgánicos de los mercados de abastos en ton/año [3]	17
4.2. Necesidades de electricidad y calor de cada digestor [4]	22
4.3. Biogas producido a partir de la digestión anaerobia de carne, pescado y verdura [5]	23
4.4. Contenido de metano en el biogás generado por cada tipo de sustrato [5]	23
4.5. Producción bruta de biogas y metano por mercado en Nm <sup>3</sup> /año	24
4.6. Producción neta anual de biogás por mercado en Nm <sup>3</sup> /año	26
4.7. Composición del digestato en función de la composición de los residuos orgánicos [4]	27
4.8. Cantidad de digestato anual producido en cada merca	28
4.9. Composición elemental del digestato de cada merca según la composición del sustrato empleado	29
4.10. Emisiones fugitivas de metano en plantas de biogás	30
4.11. Emisiones de gases a la atmósfera en Nm <sup>3</sup> /año	31
4.12. Digestato entrante al proceso de compost en ton/año	34
4.13. Parámetros para definir el impacto derivado del uso del tractor	35
4.14. Composición de nutrientes del biofertilizante	36
4.15. Emisiones producidas durante el proceso de compost	37
4.16. Asignación Económica del inventario de la digestión anaerobia	40
5.1. Asignación de fertilizante para comparar los resultados obtenidos	59
A.1. Alineación de la Digestión Anaerobia con los Objetivos de Desarrollo Sos- tenible. Fuente: [6]	3
B.1. Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante A	4
B.2. Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante B	4
B.3. Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante C	5
B.4. Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante D	5
B.5. Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante E	5
B.6. Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante F	6
B.7. Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante G	6
B.8. Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante H	6
B.9. Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante I	7
B.10. Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante J	7
B.11. Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante K	7

B.12.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante L	8
B.13.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante M	8
B.14.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante N	8
B.15.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante O	9
B.16.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante P	9
B.17.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante Q	9
B.18.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante R	10
B.19.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante S	10
B.20.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante T	10
B.21.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante U	11
B.22.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante V	11
B.23.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante W	11
B.24.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante A	12
B.25.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante B	12
B.26.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante C	13
B.27.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante D	13
B.28.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante E	13
B.29.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante F	14
B.30.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante G	14
B.31.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante H	14
B.32.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante I	15
B.33.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante J	15
B.34.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante K	16
B.35.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante L	16
B.36.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante M	17
B.37.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante N	17
B.38.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante O	17
B.39.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante P	18
B.40.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante Q	18
B.41.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante R	19
B.42.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante S	19
B.43.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante T	19
B.44.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante U	20
B.45.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante V	20
B.46.Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante W	21
B.47.Resultados obtenidos para 1 kg de fertilizante NPK 15-1-3	21
B.48.Resultados obtenidos para 1 kg de fertilizante NPK 2-0-3	22
B.49.Resultados obtenidos para 1 kg de fertilizante NPK 7-0-3	22
B.50.Resultados obtenidos para 1 kg de fertilizante NPK 6-0-3	22
B.51.Resultados obtenidos para 1 kg de fertilizante NPK 9-0-3	23

# Capítulo 1

## Objetivos y Metodología

### 1.1. Objetivos del proyecto

El objetivo final de este proyecto es cuantificar el nivel de integración en la economía circular del uso del digestato como biofertilizante para cultivos agrarios, sustituyendo así a los fertilizantes utilizados en la actualidad. Con el fin de poder cuantificarlo, se va a realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del digestato como biofertilizante, a partir de los residuos de los grandes mercados de abastos del país. Para poder lograr dicho objetivo, se han de cumplir ciertos pasos previos de acuerdo con el siguiente orden:

#### 1. Revisión Bibliográfica

Para poder ser capaz de contabilizar todos los impactos ambientales del biofertilizante, es necesario conocer al detalle todos los aspectos del proceso de producción. Por lo tanto, se ha de realizar una revisión bibliográfica sobre la digestión anaerobia, los equipos y subprocesos de ésta. Además, se ha de investigar cuál es el pos-tratamiento al que hay que someter al digestato afín de convertirlo en fertilizante.

Otro área importante de investigación será la normativa nacional y europea de fertilizantes, para ver si el uso de digestato está contemplado en ella y, por tanto, podría ser un producto comerciable como fertilizante.

Finalmente, sería de ayuda encontrar artículos de Análisis de Ciclo de Vida del proceso de digestión anaerobia para hallar maneras eficientes de organizar el inventario del ACV que se va a realizar.

#### 2. Establecimiento de las bases del ACV: límites, estructura del sistema, unidad funcional e impactos a analizar.

Estos dos son factores fundamentales a la hora de realizar un inventario de los impactos ambientales de cualquier proceso: la unidad funcional determinará el impacto de qué sustancia será analizada y, los límites, determinarán hasta qué puntos se tienen en cuenta dichos impactos; tanto aguas arriba como aguas abajo del sistema.

También es de suma importancia definir qué impactos ambientales se van a analizar, para así asegurarse que se proporciona la información correcta al modelo de ACV.

#### 3. Realización del inventario del ACV: modelar el proceso en Simapro

Una vez los límites del sistema han sido definidos, se tendrán que determinar todos los procesos que se van a tener en cuenta en el inventario de impactos, así como todas las materias primas, productos, subproductos y residuos de éstos. Para esta

fase será también necesario analizar los residuos entrantes al digestor en el caso de cada merca (su cantidad y composición), ya que estos determinarán la calidad del digestato y, consecuentemente, la del biofertilizante.

#### 4. Cálculo del ACV e interpretación de los resultados.

Una vez se ha completado el inventario, se obtienen los resultados del ACV. Estos resultados primero serán analizados separadamente en las distintas fases del proceso para ajustar el modelo si es necesario. Posteriormente, se compararán los resultados obtenidos en distintas mercas para analizar el impacto que tiene la calidad (mezcla de residuos orgánicos) de los residuos a la entrada del digestor.

#### 5. Análisis de Inclusión en la sostenibilidad.

El último paso del proyecto consistirá en la comparación de los impactos ambientales del biofertilizante con los de un fertilizante común, y se discutirá el grado de inclusión del biofertilizante en la sostenibilidad.

## 1.2. Recursos a Emplear

Como ya se ha explicado, parte de los objetivos del proyecto consisten en realizar un Análisis de Ciclo de Vida del digestato en su uso como biofertilizante. Por tanto, los recursos a emplear serán los siguientes:

- **Base de datos Ecoinvent 3.**

Ecoinvent es la base de datos de ACV con mayor consistencia y transparencia del mundo. En ella, se encuentran ya modelados muchos de las materias primas y sub-productos del proceso que se va a modelar, por lo que su uso es de vital importancia para no tener que caracterizar a mano todos los inputs e impactos de cada paso de la digestión anaerobia o post-tratamiento del digestato.

- **SimaPro.**

Es el software de realización de ACVs en el que, a partir de las bases de datos como Ecoinvent, se construyen las estructuras de los sistemas a analizar para luego calcular los resultados del ACV. Es en SimaPro donde se modelarán los procesos de digestión y post-tratamiento.

- **Herramientas de análisis de datos - Excel/Matlab**

En numerosas ocasiones, las capacidades gráficas que tiene SimaPro para interpretar los resultados no son las óptimas. Con este motivo, los resultados de los cálculos serán exportados a otras herramientas para poder realizar un mejor análisis.

# Capítulo 2

## Estado de la cuestión

En un contexto mundial donde la búsqueda de soluciones sostenibles se ha convertido en una prioridad, el análisis de ciclo de vida y la economía circular se erigen como enfoques fundamentales para evaluar el impacto ambiental de los sistemas de producción. En este sentido, el presente estado del arte tiene como objetivo explorar el uso del digestato, un subproducto resultante de la digestión anaerobia, como fertilizante orgánico y su nivel de integración en la economía circular. El digestato se presenta como una alternativa frente a los fertilizantes inorgánicos convencionales debido a sus propiedades beneficiosas para la agricultura y su potencial para cerrar los ciclos de materiales. A lo largo de este estado del arte, se examinará la composición y características del digestato, su comparación con los fertilizantes inorgánicos, así como los estudios previos sobre su uso agronómico. Además, se abordará la metodología del análisis de ciclo de vida aplicada a la agricultura, con el propósito de evaluar de manera integral los impactos ambientales asociados al uso del digestato como fertilizante orgánico.

### 2.1. El análisis de ciclo de vida como herramienta para la evaluación de impactos ambientales

La idea del análisis de ciclo de vida se introduce por primera vez en Europa a finales de la década de los 60 [7], cuando el agotamiento de recursos naturales empezó a cobrar importancia en las preocupaciones de la sociedad. Inicialmente, el A.C.V. nace con los estudios de envases de productos en Europa y E.E.U.U., que sólo tenían en cuenta unas pocas emisiones y cuya metodología variaba considerablemente dependiendo de la compañía que lo implementase. No es hasta la última década del siglo XX que se unificaron los esfuerzos internacionales para crear una metodología común, permitiendo así tener un canon de comparación entre distintos estudios. Hoy en día, el A.C.V. es la metodología de referencia para evaluar los impactos ambientales y socioeconómicos de un producto o servicio a lo largo de todas las etapas de su vida: desde la extracción de los recursos naturales, a la disposición final de los residuos generados cuando el producto llega al fin de su vida útil. Especialmente, el A.C.V. se utiliza para evaluar el rendimiento ambiental de un producto frente a otro, y así, poder ayudar en la toma de decisiones ambientales.

El concepto principal del A.C.V. consiste en comprender a fondo el proceso de producción del producto o servicio a analizar [8], y descomponerlo en flujos unitarios. Para cada flujo, es necesario realizar un inventario de materias primas y productos necesarios,

servicios, emisiones y residuos, completando así un inventario global de todas las entradas y salidas del proceso y su contribución a ciertos impactos medioambientales. Generalmente, estos impactos se contabilizan con la ayuda de softwares específicos de A.C.V. con librerías de impactos ambientales y socioeconómicos de muchos procesos y servicios estandarizados de la industria, simplificando así el trabajo de recopilación de impactos.

La metodología del A.C.V. ya ha sido aplicada a la digestión anaerobia y la generación de biogás. Por ejemplo, [9] estudia los impactos ambientales de la D.A. de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, y [10] compara los resultados obtenidos para la D.A. de distintos sustratos en Italia, favoreciendo las pequeñas instalaciones agropecuarias sobre los grandes digestores de cultivos energéticos. Sin embargo, los resultados del A.C.V. dependen fuertemente de las características del proceso, haciendo necesario un estudio a medida para cada caso según el digestor, el sustrato y las condiciones de producción.

## 2.2. Economía circular: principios y el rol de la digestión anaerobia

La economía circular es un modelo de producción y consumo que pretende luchar contra algunos de los grandes problemas de la sociedad moderna, como son el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la contaminación y la creciente tendencia de generación de residuos. Para ello, la economía circular se basa en 3 principios clave [11]:

- Eliminar residuos y contaminantes
- Recircular productos y materiales
- Regenerar la naturaleza

Estos tres principios son directamente aplicables a la industria alimentaria y al sector agrícola, donde las emisiones de fertilizantes y el desecho de la mayor parte de los productos antes de llegar al consumidor final afectan negativamente tanto al medio ambiente como a la economía de productores, consumidores y países.

En el contexto de la economía circular, la digestión anaerobia contribuye de manera directa a los tres principios clave: eliminando residuos de los vertederos para darles otro uso, reconvirtiendo residuos orgánicos en una fuente de energía como es el biogás, y contribuyendo a regenerar la naturaleza al reducir la contaminación de suelos y aguas. Adicionalmente, el uso de digestato como fertilizante natural evita el agotamiento de recursos naturales en la producción de fertilizantes inorgánicos, y contribuye a la restauración de la materia orgánica de suelos dañados o poco fértiles.

## 2.3. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que los microorganismos, en ausencia de oxígeno, descomponen la materia orgánica entrante (ver Figura 4.2). El proceso consta de cuatro etapas principales [2]: hidrólisis, acetogénesis, acidogénesis y metanogénesis. En la etapa de hidrólisis, las moléculas orgánicas complejas se descomponen en moléculas más simples como carbohidratos, lípidos y proteínas; en la etapa de acetogénesis, las moléculas simples se convierten en ácidos orgánicos y gases, como el hidrógeno y el dióxido de carbono. Posteriormente, en la acidogénesis, los ácidos orgánicos se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, lo que reduce el pH total. Finalmente, en la etapa de metanogénesis, los microorganismos convierten el ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono en metano y dióxido de carbono.

Aunque no sea un proceso muy conocido por la sociedad, la idea de la digestión anaerobia tiene sus orígenes hace miles de años, cuando en Asiria utilizaban biogás para calentar las aguas sanitarias [12]. Las primeras evidencias científicas de la presencia de gases inflamables en los residuos orgánicos se recopilan a finales del siglo XVIII, pero no es hasta el año 1808 que Sir Humphry Davy determina que se produce metano al descomponer purines en condiciones anaerobias. Tras varios casos de éxito, la digestión anaerobia se instala en Europa como tecnología madura hace aproximadamente unos 20 años, en forma de digestores anaerobios anexionados a granjas de ganado. Actualmente, existen 600 plantas de digestión anaerobia en Europa, de las cuales el 40% se han instalado en Alemania en los últimos 5 años.

Durante una primera etapa de investigación, y con el fin de conocer a fondo el proceso de D.A. para realizar correctamente el inventario del análisis de ciclo de vida, se han tomado como referencia los estudios [13], [9] y [14], que detallan procesos de D.A. y pretratamientos para distintos sustratos y volúmenes de digestor.

### 2.3.1. Variedad de sustratos y el potencial de la codigestión

La digestión anaerobia es un proceso aplicable a varios tipos de residuos orgánicos, entre los que se encuentran:

- Residuos agrícolas como restos de cultivo no aprovechables (tallos, hojas, bagazo de caña de azúcar, etc).
- Residuos alimentarios: comida en mal estado, alimentos no aptos para el consumo humano, y restos de comida como pieles de fruta y verdura o recortes de carne y pescado.
- Estiércol animal proveniente del ganado.
- Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, que se compone de alimentos y residuos de jardín.

- Aguas residuales municipales

La elección del sustrato es, generalmente, el mayor condicionante de la instalación de un digestor anaerobio ya que no es el sustrato el que se desplaza al digestor sino que es el digestor el que se instala a los alrededores de la fuente generadora del sustrato. Es por este motivo que, según el IDAE [15], de las 146 instalaciones de biogás que existen en España, 46 se sitúan en vertederos, 34 en estaciones de depuración de aguas residuales y 13 en instalaciones agropecuarias. El tipo y cantidad de sustrato también condiciona la calidad de biogás producido, ya que esta depende directamente de la composición química del sustrato a tratar, así como de los hongos y bacterias presentes y que son los responsables de las reacciones que ocurren dentro del digestor [16].

Debido al impacto del sustrato en la calidad y cantidad de gas producido, se ha introducido el concepto de codigestión. La codigestión consiste en mezclar los distintos tipos de sustratos mencionados anteriormente con el fin de eliminar la dependencia de un único sustrato y aprovecharse de beneficios sinérgicos, en los que las composiciones químicas de los distintos sustratos se complementan resultando en una mayor producción de biogás. Sin embargo, es importante tener en cuenta que para que la codigestión tenga un impacto positivo, es necesario un estudio previo para determinar la compatibilidad de los sustratos, la proporción de la mezcla, así como un control y monitoreo que garantice la eficiencia del proceso. En el caso de este estudio, los sustratos a tratar provienen de los mercados de abastos en forma de pieles de fruta y verdura y recortes de carne y pescado, por lo que en muchos de los digestores que se van a analizar existirá una codigestión de residuos vegetales, cárnicos y de pescado que, en función de la proporción de cada uno, producirá una composición y cantidad de biogás distinto (como se demuestra en [17]).

## 2.4. Post tratamientos del digestato para su uso como fertilizante

Cuando el digestato sale del digestor anaerobio, es una mezcla de minerales y agua, y generalmente con una humedad superior al 60% [17]. Además, y según el sustrato de origen en la digestión anaerobia, el digestato puede contener también micro plásticos y/o metales pesados, aunque no es el caso de los residuos agroalimentarios. Para poder aplicar el digestato como fertilizante seco en suelos, primero es necesario eliminar el excedente de humedad con el que sale del digestor, para lo que se somete al digestato a un proceso de post tratamiento. De acuerdo con la revisión literaria realizada en [18], algunos de los procesos de post tratamiento más utilizados son:

- Centrifugación o secado por tambor: para separar las fracciones sólidas y líquidas del digestato. Un ejemplo de uso de este proceso y su evaluación ambiental se estudian en [19].

- Compost: se deja fermentar la materia orgánica al aire libre, lo que permite alcanzar altas temperaturas, que reducen la humedad de la mezcla.
- Secador de cinta: se hace circular el digestato a través de una cámara de secado mediante el uso de una cinta transportadora, elevando su temperatura y reduciendo su humedad.
- Secado natural: se deposita el digestato al aire libre, en un espacio donde le pueda dar el sol, para que su calor evapore progresivamente la fracción líquida.
- Microfiltración: esta técnica se utiliza cuando se quiere una separación total de las fracciones sólida y líquida y, generalmente, en una segunda etapa de separación. Consiste en el uso de unas membranas con poros de tamaño muy (membranas de ósmosis inversa o intercambiadores de iones), que atrapan los sólidos en suspensión y dejan pasar los líquidos.

La elección del proceso de post tratamiento para separar el digestato influye no sólo directamente en la eficiencia del proceso de separación de fracciones sólidas y líquidas, si no también en los costes de inversión y mantenimiento de las instalaciones. De esta manera, un secado solar no es tan eficiente como una separación por micro filtración con membranas, pero tiene un coste mucho menor.

## 2.5. Los fertilizantes inorgánicos y sus componentes

Los fertilizantes inorgánicos son unos aditivos empleados en la agricultura para aportar al suelo los nutrientes necesarios para aumentar o reponer su fertilidad. Tradicionalmente, esta revitalización de los suelos se llevaba a cabo utilizando estiércoles animales y demás materia orgánica, y no fue hasta mediados del s. XIX ([20]) que se avanzó en los conocimientos de la horticultura dando con una fórmula inorgánica, mucho más efectiva en el aporte de nutrientes a los suelos: los fertilizantes inorgánicos. Desde entonces, su aplicación creció entre los agricultores hasta convertirse en los fertilizantes más utilizados del planeta. A continuación, la Figura 2.1 muestra los datos de uso de fertilizantes inorgánicos en el mundo en el año 2020.

Los fertilizantes inorgánicos se obtienen a través de distintos procesos industriales según el nutriente que se quiera obtener. Por ejemplo, los fertilizantes de base nitrogenada se obtienen mediante un proceso Haber-Bosch, que combina nitrógeno atmosférico con hidrógeno para producir amoníaco (el cual actúa como base de nitrógeno para generar otros compuestos). Los fertilizantes basados en fósforo se derivan principalmente de la extracción de fosfatos de rocas, que son luego procesados para llegar a las moléculas de fósforo deseadas. Otro ejemplo, los fertilizantes basados en potasio, se obtienen del procesamiento químico de sales naturales con alto contenido en este mineral.

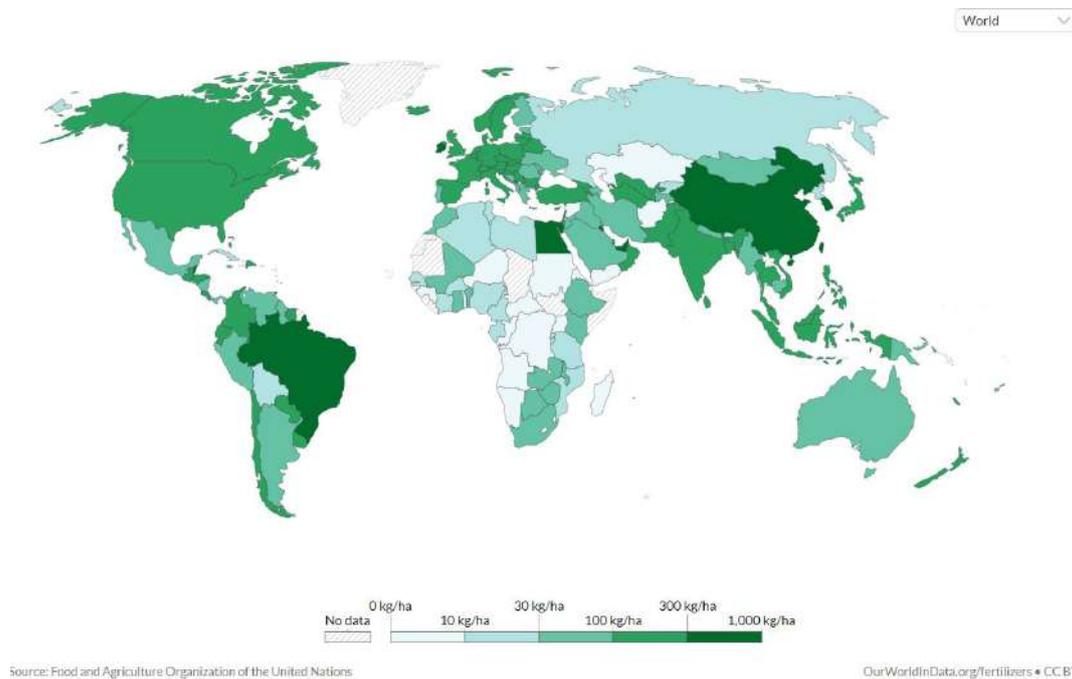


Figura 2.1: Consumo global de fertilizantes inorgánicos en 2020. Fuente: [1]

Los fertilizantes inorgánicos más comunes son una familia denominada NPK, y están constituidos principalmente por nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), además de otros macro nutrientes como calcio, magnesio, hierro, etc (para mayor información sobre su composición, consultar [21]). Dentro de los NPK, existen muchas variedades de productos, dependiendo del porcentaje de cada nutriente que se incluya en la mezcla total del fertilizante, y estos porcentajes dependen del efecto del nutriente que se quiera potenciar. Por ejemplo, el nitrógeno promueve el crecimiento de las hojas y el tallo de las plantas, el fósforo ayuda al crecimiento y desarrollo de las raíces y frutos, y el potasio a la salud general y resistencia de las plantas. De esta manera, si el agricultor busca ayudar a sus cultivos de una manera concreta, buscará un NPK con mayor contenido en un mineral u otro.

Como ya se ha mencionado, estos fertilizantes no son orgánicos, así que una producción descontrolada puede llevar a un agotamiento de recursos naturales. Asimismo, el aporte de nutrientes de manera artificial y descontrolada puede contaminar el medio natural, degradando el suelo y generando un desequilibrio de nutrientes. Por ejemplo, el exceso de nitrógeno en masas de agua aportado por las escorrentías de campos de cultivo contribuye directamente a los procesos de eutrofización y, por tanto, a la destrucción de la biodiversidad de estas aguas. Es por estos motivos que se están realizando esfuerzos para controlar la aplicación y encontrar sustitutos naturales a los fertilizantes inorgánicos, como es el caso del biofertilizante producido con el digestato de la digestión anaerobia.

## 2.6. Uso del digestato como biofertilizante: historia y legislación

El concepto de digestato como fertilizante orgánico no dista mucho de las prácticas tradicionales de fertilización en las que se usan residuos orgánicos y estiércoles directamente sobre el suelo, el único cambio es que estos residuos orgánicos son tratados con anterioridad para obtener metano biogénico, en lugar de dejar que este se emita a la atmósfera de manera directa. Sin embargo, el concepto de digestato como biofertilizante es relativamente moderno:

El surgimiento de la digestión anaerobia en el s.XX tenía como objetivo principal la producción de biogás, por lo que el digestato de la digestión anaerobia tenía condición de residuo al ser la parte no aprovechable de este proceso. Por este motivo, el digestato era generalmente secado y trasladado a vertedero y, en muy pocas ocasiones, utilizado en pequeñas cantidades como enmienda del suelo. No es hasta finales del s.XX que, debido a una mayor sensibilidad de la sociedad de cara al reciclaje y aprovechamiento de residuos, el digestato y su gestión adquieren una mayor importancia. Fue a partir de entonces cuando se comenzaron a realizar estudios para entender su composición y su capacidad de fertilización de suelo.

A medida que se han ido acumulando evidencias científicas sobre los beneficios agrónomos y ambientales del digestato, su uso como fertilizante ha experimentado un aumento significativo en las últimas décadas. Desde hace aproximadamente 15 años, el fertilizante se ha convertido en el uso más común del digestato. Sin embargo, a pesar de su creciente demanda y aceptación, durante mucho tiempo existieron barreras legales y regulatorias que impedían su comercialización. Esto se debía a que el digestato era considerado como un residuo en lugar de ser reconocido como un valioso subproducto. Esta clasificación como residuo limitaba su comercialización y generaba incertidumbre en cuanto a su valor económico. Como resultado, el costo del digestato oscilaba entre precios negativos y positivos, dependiendo de las restricciones regulatorias y los mercados locales.

Fue en 2019 cuando la Unión Europea incluyó al digestato en la Directiva de Abonos, un hito importante que marcó un cambio significativo en su estatus legal y reconocimiento como fertilizante. Esta inclusión fue adoptada por decreto ley en España en el mismo año. Ahora, el digestato se contempla oficialmente como un fertilizante y se establecen requisitos y normativas para su producción, calidad y etiquetado. Esta medida ha brindado seguridad jurídica y ha fomentado su uso generalizado como una opción viable y regulada en la agricultura [22].

# Capítulo 3

## Objetivo y alcance del análisis de ciclo de vida

A continuación, se detallarán las fases del ACV. Estas sentarán las guías para realizar el inventario de impactos ambientales del biofertilizante, de acuerdo con al metodología de realización de análisis de ciclo de vida [8], y se detallarán también las categorías de impacto que serán analizadas una vez completado el inventario del análisis de ciclo de vida.

### 3.1. Función y Unidad Funcional

El ACV que se va a realizar en este proyecto es un ACV atribucional, es decir, se tratará de representar el proceso del biofertilizante aislado del resto de la economía y estableciendo unos límites claros a partir de los cuales se dejan de tener en cuenta sus impactos.

La unidad funcional de un ACV es la cantidad medible de producto para la cual se van a contabilizar los impactos del inventario. En este proyecto, la unidad funcional será 1 kg de biofertilizante producido a partir del digestato.

### 3.2. Límites del sistema

Como ya se ha explicado con anterioridad, los límites del sistema representan los puntos a partir de los cuales se dejan de tener en cuenta los impactos del proceso. A continuación, se detallan las fronteras del sistema, ilustrados en la Figura 3.1:

- Este ACV pretende analizar los impactos para la producción del biofertilizante. Por lo tanto, sólo se tendrán en cuenta los flujos de operación del digestor, y se despreciarán las actividades de recarga (limpieza del digestor y recarga del sustrato de microorganismos). Además, el digestor medio ha de ser recargado cada 5 años, por lo que los impactos de limpieza y renovación del sustrato de la recarga dividido entre las toneladas de digestato producido a lo largo del tiempo de operación resultan despreciables.
- Para el proceso del biofertilizante, los límites del sistema son; aguas arriba, la entrada de los residuos orgánicos al digestor y, aguas abajo, la obtención del biofertilizante.

El objetivo de este estudio es comparar los impactos de producción del biofertilizante y el fertilizante inorgánico común, por lo que el inventario de análisis de ciclo de vida termina con la obtención de dichos productos, y el impacto de éstos tras su aplicación no será analizado.

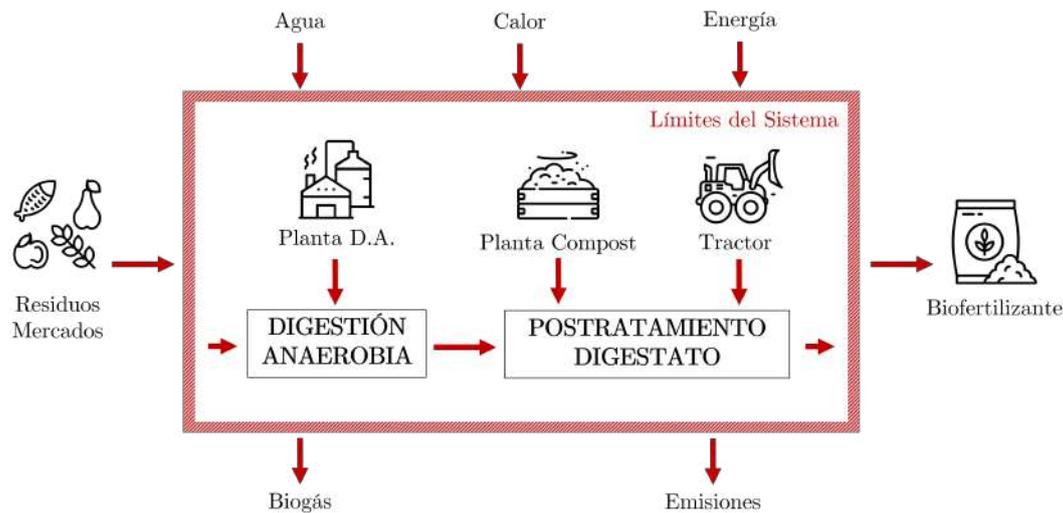


Figura 3.1: Alcance del inventario del análisis de ciclo de vida

- En cuanto a la infraestructura utilizada durante el proceso, se tendrá en cuenta la planta de digestión anaerobia o digestor, y la planta de compost. Para poder inventariar los impactos correspondientes a la infraestructura por kg de biofertilizante producido, habrá que contabilizar sus impactos de construcción totales y dividirlos por la cantidad de residuos tratados a lo largo de su vida útil.
- No se contemplará el transporte de los residuos orgánicos del mercado de abastos al digestor, sino que se supone que el digestor se encuentra en las instalaciones propias del mercado. Tampoco habrá transporte del digestato para su post-tratamiento, ya que este se realizará in situ.
- En este estudio sólo se contemplarán emisiones atmosféricas de los procesos tratados. En todo momento se asume que la digestión anaerobia de residuos y el post-tratamiento de digestato se realizan en plantas homologadas con dispositivos de prevención de fugas al suelo y equipos de tratamiento de aguas residuales, que impiden cualquier tipo de emisión de contaminantes al suelo y aguas locales.

### 3.3. Impactos a analizar

Una vez recogidos todos los datos necesarios para completar el inventario del análisis de ciclo de vida (de acuerdo con los límites del sistema establecidos en el anterior pun-

to) estos serán evaluados de acuerdo con el método CML-IA, un método creado en el Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden en 1992, y que ha sido desde entonces adoptado por la comunidad científica europea. El método CML evalúa los siguientes impactos:

- **Agotamiento de Recursos Abióticos:** Esta categoría de impacto afecta al bienestar humano, y a la salud humana y de los ecosistemas, y se contabiliza a través de la extracción de minerales y combustibles fósiles para las entradas de los procesos del inventario. El ADF (Abiotic Depletion Factor), se determina como kg equivalente de antimonio extraído contra las reservas naturales de este mineral, y se mide a escala global.
- **Cambio Climático:** Se cuantifica a escala global, a través de las emisiones de efecto invernadero producidas y su potencial de calentamiento global, utilizando la masa de  $CO_2$  equivalente emitida a la atmósfera.
- **Agotamiento de Ozono Estratosférico:** El agotamiento de la capa de ozono es un serio problema debido a la mayor cantidad de radiación ultravioleta que penetra en la atmósfera hasta la superficie terrestre, y que deriva en serios problemas de salud (humana, vegetal y animal), alterando los ciclos bioquímicos de la naturaleza. De acuerdo con lo establecido por la organización Meteorológica Mundial, el método CML define el potencial de agotamiento de la capa de ozono de un proceso como los kilogramos equivalentes de CFC-11 por kg de emisión del proceso analizado.
- **Toxicidad Humana:** Esta categoría contabiliza los efectos tóxicos que pueda tener el proceso analizado sobre la salud humana. Es un proceso complejo, ya que combina la toxicidad de emisiones con la vulnerabilidad y exposición a estas. Esta toxicidad se contabiliza, tanto de manera local como global, para los kg equivalentes de biclorobenceno presentes en cada kg de emisiones.
- **Eco-toxicidad Marina y de Agua Dulce:** Contabiliza la emisión de sustancias tóxicas a los medios acuáticos a través de las emisiones atmosféricas, al agua y al suelo que tenga el proceso analizado. Como con la toxicidad humana, se mide en función de los kg equivalentes de biclorobenceno por kg de emisiones.
- **Eco-toxicidad Terrestre:** Contabiliza la emisión de sustancias tóxicas a los ecosistemas terrestres a través de las emisiones atmosféricas, al agua y al suelo que tenga el proceso analizado. Se mide en función de los kg equivalentes de biclorobenceno por kg de emisiones, al igual que la toxicidad humana.
- **Oxidación Fotoquímica:** Conciernen la formación de sustancias reactivas (principalmente ozono) que puedan interactuar con otras y dañar la salud humana y de los ecosistemas, y se mide tanto a escala local como global a través de las emisiones equivalentes de etileno.

- **Acidificación:** Mide el potencial de acidificación de aguas continentales y marinas a escala global y local a través de las emisiones equivalentes de  $SO_2$ .
- **Eutrofización:** Incluye todos los impactos derivados de niveles excesivos de macronutrientes en aguas como consecuencia de las emisiones del proceso. El potencial de nutrificación (NP) se mide a través de las emisiones equivalentes de  $PO_4^{3-}$ .

# Capítulo 4

## Elaboración del inventario del análisis de ciclo de vida del biofertilizante

El inventario de un ACV es donde se recopilan todos los procesos que son necesarios para la elaboración de la unidad funcional, y que están comprendidos dentro de los límites del sistema. Para poder atribuir los impactos de estos procesos a la unidad funcional que se analiza (el 1 kg de biofertilizante en este caso), es necesario establecer la relación y orden entre procesos, así como las cantidades de recurso que necesitan. Con el fin de que no se olvide ningún proceso en la construcción del modelo, la metodología de ACV determina los pasos a seguir para identificar los flujos del inventario, dividiendo los distintos procesos por niveles de prioridad [8]:

- **Nivel 0: El proceso unitario que contiene el flujo de referencia para producir la unidad funcional.** Como la unidad funcional a estudiar es 1 kg de biofertilizante, los procesos clave para producirla y que, por tanto, conforman el flujo de referencia, son la digestión anaerobia de los residuos alimentarios y el post-tratamiento del digestato.
- **Nivel 1: Los procesos que producen recursos que sirven de materia prima o componentes para el flujo de referencia.** En el caso del biofertilizante serán los residuos agroalimentarios que son digeridos.
- **Nivel 2: Procesos y recursos para la elaboración de la unidad funcional y su control de calidad.** Son la electricidad, calor y agua que necesita el digestor para operar. Además se añaden a este nivel la contabilidad y gestión de subproductos y emisiones, es decir, la producción de biogás, el agua de lixiviado del compost y las emisiones del flujo principal.
- **Nivel 3: Procesos que dan servicios al flujo de referencia, como administración o logística.** Debido a los límites del sistema impuestos para este ACV, no se contemplan ninguna de estas actividades, por lo que no habrá procesos de nivel 3.
- **Nivel 4: Procesos que producen o mantienen la infraestructura que permite la realización del flujo de referencia.** A este nivel corresponden la infraestructura del digestor anaerobio, planta de compost y el tractor que airea el compost.

La Figura 4.1 representa todos los flujos del proceso, clasificados según su nivel de prioridad.

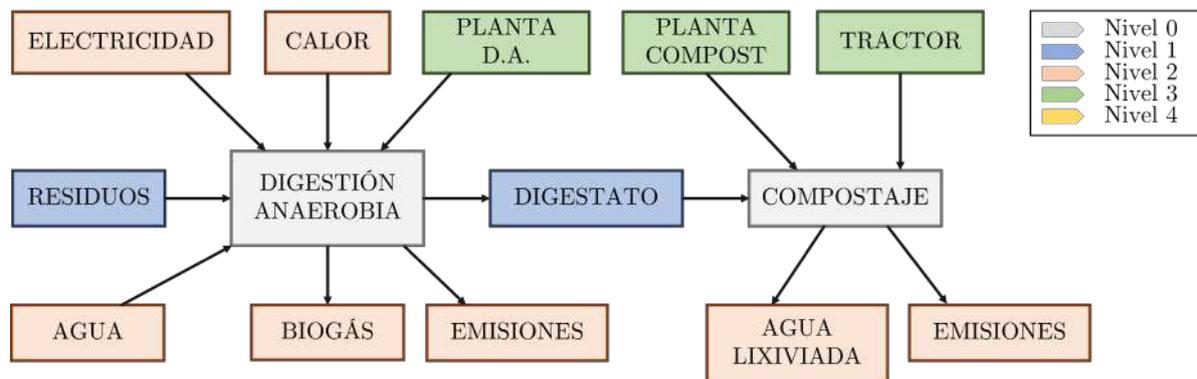


Figura 4.1: Niveles del inventario del ACV

A lo largo de este capítulo, se detallarán los componentes y cantidades de cada uno de los niveles detallados en la Figura 4.1. Como todos estos flujos dependen del Nivel 0, es decir, de la fase de digestión anaerobia y compost, se modelarán directamente como entradas o salidas de estos procesos. Los únicos procesos que se tratarán por separado, serán los residuos orgánicos a la entrada del digestor y el propio digestato, es decir, los flujos de nivel 1.

## 4.1. Proceso de Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el que los microorganismos descomponen la materia orgánica entrante en ausencia de oxígeno (ver Figura 4.2). El proceso consta de cuatro etapas principales [2]: hidrólisis, acetogénesis, acidogénesis y metanogénesis. En la etapa de hidrólisis, las moléculas orgánicas complejas se descomponen en moléculas más simples como carbohidratos, lípidos y proteínas; en la etapa de acetogénesis, las moléculas simples se convierten en ácidos orgánicos y gases, como el hidrógeno y el dióxido de carbono. Posteriormente, en la acidogénesis, los ácidos orgánicos se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, lo que reduce el pH total. Finalmente, en la etapa de metanogénesis, los microorganismos convierten el ácido acético, hidrógeno, metano y dióxido de carbono.

Todas estas fases biológicas tienen lugar dentro del propio digestor, y sin necesidad de aportar ningún tipo de recurso entre una y otra. Debido a esto, y que las herramientas de ACV de las que se disponen no llegan al nivel de procesos microbiológicos, la digestión anaerobia se modelará en su totalidad como un único proceso o caja negra, al que se le aportan los recursos necesarios para que las reacciones biológicas tengan lugar.

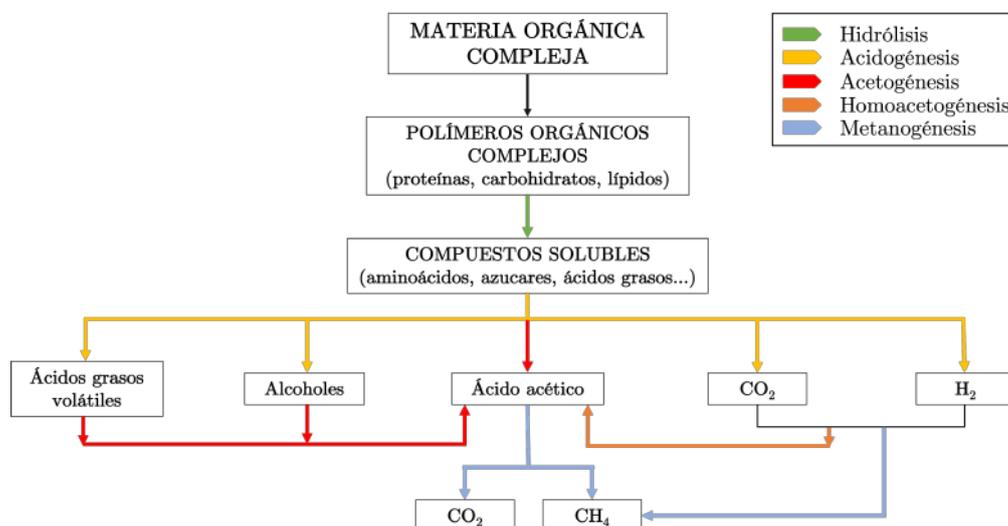


Figura 4.2: Proceso de Digestión Anaerobia [2]

A continuación, se utilizará la clasificación de recursos establecida por el Software Simapro para detallar las entradas y salidas atribuidas al modelo de digestión anaerobia:

#### 4.1.1. Entradas de la Naturaleza

En un contexto de análisis de ciclo de vida, las entradas de la naturaleza son aquellos elementos que, salvo por su proceso de extracción u obtención, son directamente obtenidos de la naturaleza y no han sido transformados por ningún proceso industrial. En el caso de la digestión anaerobia de residuos orgánicos no se utiliza ningún recurso de este tipo, ya que todos los materiales son provenientes de la tecnosfera.

#### 4.1.2. Entradas de la Tecnosfera: Materiales y Combustibles

En un contexto de análisis de ciclo de vida, las entradas de la tecnosfera son los recursos que se utilizan en un proceso o producto que han sido producidos por la actividad humana, como materiales, energía y tecnología. Estos son los materiales y recursos utilizados en el proceso de digestión anaerobia:

##### 4.1.2.1. Residuos Orgánicos de las Mercas

Como ya se ha mencionado en los objetivos del proyecto, los datos de entrada al modelo de digestión anaerobia serán los datos reales de los volúmenes de residuos alimentarios producidos en los mercados de abastos o mercas. La Tabla 4.1 muestra los residuos producidos en función de su naturaleza (carne, pescado, verdura), y su merca de origen [3]. De esta manera, se podrá crear un material llamado 'Residuo Orgánico' para cada merca, que entre al proceso de digestión anaerobia y cuya composición sea la respectiva de residuo de carne, verdura y pescado.

Tabla 4.1: Residuos alimentarios orgánicos de los mercados de abastos en ton/año [3]

	Total Residuos	Verdura	Pescado	Carne	Total Orgánico Aprovechable
A	25,5	0,00	1,79	0,00	1,79
B	2774,7	138,74	0,00	0,00	138,74
C	859,8	128,97	0,00	0,00	128,97
D	54,97	6,05	3,85	0,00	9,89
E	23551,45	5770,11	2472,90	1059,82	9302,82
F	3039	372,28	212,73	0,00	585,01
G	738,92	73,89	73,89	0,00	147,78
H	345,6	57,02	0,00	0,00	57,02
I	1597,2	119,79	79,86	0,00	199,65
J	379,5	47,44	22,77	0,00	70,21
K	451,7	49,69	27,10	0,00	76,79
L	2190,9	536,77	230,04	98,59	865,41
M	245,7	51,60	20,88	0,00	72,48
N	29553,5	7388,38	4433,03	1182,14	13003,54
O	2705	324,60	175,83	0,00	500,43
P	1271	311,40	133,46	57,20	502,05
Q	2702,1	553,93	0,00	67,55	621,48
R	504,3	105,90	55,47	0,00	161,38
S	348	76,56	0,00	0,00	76,56
T	3524,75	863,56	370,10	158,61	1392,28
U	1182	183,21	0,00	0,00	183,21
V	3330	549,45	0,00	0,00	549,45
W	2039	499,56	214,10	91,76	805,41

#### 4.1.2.2. Agua

Generalmente, al digestor se le añade agua por tres motivos:

- Si el residuo a tratar no tiene la suficiente humedad, para proporcionar el agua necesaria para la supervivencia de los microorganismos del sustrato.
- Regular el pH del interior del reactor.
- Contribuir a la regulación de la temperatura en el reactor.

En el caso de los residuos alimentarios, es necesario aportar agua para controlar la acidez del sustrato. Generalmente, con el fin de no consumir agua limpia de la red local de

aguas, y de aprovechar al máximo los residuos del proceso, este agua proviene de una realimentación de la etapa de secado del digestato [23].

La cantidad de agua que es realimentada del proceso de pos-tratamiento del digestato será determinada como el efluente de dicho proceso, por lo que se determinará en la Sección 4.2.

#### 4.1.2.3. Sustrato

El sustrato es el material que se introduce en el inicio del ciclo de operación del digestor para poder crear la población de microorganismos necesaria para la digestión anaerobia. Generalmente, este sustrato se introduce de tres maneras posibles: con un cultivo de microorganismos en placa petri, introduciendo estiércol en el digestor, o introduciendo fangos de depuradora en el digestor. Como el sustrato sólo se introduce en pequeñas cantidades al inicio del ciclo, y los ciclos de operación sobrepasan los 5 años de duración, el impacto del sustrato por tonelada de residuos digerida es despreciable, por lo que el sustrato no será contabilizado en el inventario del análisis de ciclo de vida.

#### 4.1.2.4. Aditivos

Los aditivos son sustancias que se añaden al sustrato para mejorar el proceso de digestión y optimizar la producción de biogás. Pueden tomar distintas formas: micro nutrientes, ácidos grasos volátiles, surfactantes... Como con el sustrato, estos aditivos se emplean sólo en los periodos de recarga del digestor, por lo que no se van a tener en cuenta en el inventario de análisis de ciclo de vida.

#### 4.1.2.5. Infraestructura

Para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia de residuos orgánicos, se requiere disponer de las instalaciones adecuadas. En consecuencia, para calcular el impacto ambiental de dicho proceso es necesario considerar el impacto de dichas instalaciones, lo que implica tener en cuenta los impactos ambientales derivados tanto de la extracción de materiales como de la construcción de la infraestructura.

No obstante, dado que los impactos ambientales asociados a la infraestructura se producen mucho antes de la producción del digestato, resulta necesario realizar una atribución temporal de los mismos al producto. Para ello, se debe dividir el impacto total de la infraestructura entre el número de años de operación de la planta, obteniendo así los impactos ambientales equivalentes a un año de funcionamiento de dicha infraestructura. De este modo, se podrá calcular el impacto ambiental total de infraestructura asociado al proceso de digestión anaerobia de residuos orgánicos.

Para homogeneizar el cálculo de la amortización en los 23 casos que se estudian, se tomará una digestor anaerobio estándar para todos ellos. El digestor, que ya está introducido en la base de datos de SimaPro, tiene las siguientes características:

1. Vida útil del digestor: 20 años.
2. Capacidad del reactor: 500  $m^3$ .
3. Residencia de residuo dentro del reactor: 21 días.

Con estos datos, se puede calcular la fracción del impacto total de la infraestructura correspondiente a cada  $m^3$  de residuo:

$$\frac{500m^3/digestor}{21días} = 28,3\frac{m^3}{día} \quad (4.1)$$

$$\frac{28,3m^3/día}{365días/año} \cdot 20años = 173809 \quad (4.2)$$

Por lo que el impacto asociado de infraestructura por cada  $m^3$  de residuo entrante será el impacto total de esta, dividido por 173809. Alternativamente, la amortización anual de infraestructura corresponderá a la total, dividida por los 20 años de vida del digestor.

$$Amortizacion_{anual} = Impacto_{digestor} \cdot \frac{1}{20} = Impacto_{digestor} \cdot 0,05 \quad (4.3)$$

### 4.1.3. Entradas de la Tecnosfera: Electricidad y Calor

Estos elementos son aquellos que, habiendo sido producidos por la actividad humana, son empleados para hacer funcionar el proceso de producción. En un proceso de digestión anaerobia es necesario aportar calor para mantener la temperatura óptima de los microorganismos que intervienen en el proceso. Esta temperatura suele estar entre 35°C y 55°C, dependiendo del tipo de microorganismos presentes. Además, el calor también ayuda a descomponer los residuos orgánicos más rápidamente y a reducir el tiempo de retención necesario en el digestor anaerobio. Por otro lado, se requiere electricidad para operar el propio sistema.

En la actualidad, los digestores anaerobios están orientados hacia la autosuficiencia energética, lo que significa que una parte del biogás generado se utiliza como combustible para cubrir las necesidades de electricidad y calor de la planta, mientras que el excedente se considera como la energía neta producida por el sistema [24]. A continuación, se analizará la demanda energética de proceso en forma de biogás requerido para electricidad y calor, de acuerdo con las hipótesis formuladas en [4]:

#### 4.1.3.1. Calor

La demanda total de calor del proceso  $Q_{in}$  se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{in} = Q_t + Q_p + Q_{pre} \quad (4.4)$$

Donde  $Q_t$  [ $\frac{GJ}{año}$ ] es el calor requerido anualmente para elevar la temperatura de los residuos hasta la temperatura a la que se produce la digestión anaerobia (o temperatura del reactor).

$$Q_t = \frac{F_p \cdot C_p \cdot \rho \cdot (1 - R_{re}) \cdot (T_t - T_e)}{1000} \quad (4.5)$$

- $F_p$ : cantidad de residuo orgánico introducido al reactor cada año [ $m^3/año$ ]
- $C_p$ : calor específico de los residuos orgánicos introducidos. Debido al alto contenido en agua de estos residuos y la disparidad de composición según su origen, se tomará el calor específico del agua (4186 kJ/ton °C)
- $\rho$ : densidad de los residuos orgánicos introducidos. Debido al alto contenido en agua de estos residuos y la disparidad de composición según su origen, se tomará la densidad del agua.
- $R_{re}$ : eficiencia del sistema de recuperación de calor de la planta de digestión anaerobia, del 85 % [25].
- $T_t$ : temperatura del reactor anaerobio (Se tomará una temperatura de reactor  $T_t = 37^\circ C$  [26]).
- $T_e$ : temperatura de los residuos a la entrada del reactor ( $T_e = 30^\circ C$ ).

$Q_p$  [ $\frac{GJ}{año}$ ] simboliza las pérdidas de calor al ambiente que han de ser contrarrestadas para mantener estable la temperatura del reactor.

$$Q_p = \sum_{\substack{aire, tierra, \dots \\ digestor}} U \cdot A \cdot (T_t - T_a) \cdot \frac{86,5}{1000} \quad (4.6)$$

- $U$ : coeficiente de transmisión de calor del digestor [ $W/m^2^\circ C$ ]
- $A$ : área superficial del digestor [ $m^2$ ]
- $\rho$ : densidad de los residuos orgánicos introducidos. Debido al alto contenido en agua de estos residuos y la disparidad de composición según su origen, se tomará la densidad del agua.
- $T_a$ : temperatura ambiente  $T_a = 30^\circ C$ .
- 86,5: conversión de unidades de W a kJ/día

Finalmente,  $Q_{pre}$  [ $\frac{GJ}{año}$ ] corresponde a la demanda de calor del sistema de precalentamiento de los residuos, pero este no será tenido en cuenta al considerarse un reactor sin precalentamiento.

#### 4.1.3.2. Electricidad

La demanda total de electricidad  $E_{in}$  [ $\frac{kJ}{m^3}$ ] del sistema se puede expresar de la siguiente manera [25]:

$$E_{in} = E_b + E_m + E_e + E_{pre} \quad (4.7)$$

Donde  $E_b$  representa la electricidad utilizada para impulsar la bomba que suministra residuos orgánicos al reactor, de acuerdo con [25].

$$E_b = 2 \cdot 1,8 \cdot F_p \quad (4.8)$$

Por otro lado,  $E_m$  se refiere a la electricidad demandada por el sistema de agitado,  $E_{pre}$  la del sistema de precalentamiento, y  $E_e$  la de los demás equipos. Como ya se explicó en los límites del sistema, el reactor considerado para este estudio no tiene sistema de agitación ni precalentamiento, por lo que sólo se tendrá en cuenta la demanda de energía proveniente del sistema de impulsión de los residuos orgánicos. A continuación, la Tabla 4.2 recoge las necesidades de electricidad y calor de cada digester anaerobio de acuerdo con la metodología presentada en [4]:

Tabla 4.2: Necesidades de electricidad y calor de cada digestor [4]

	Necesidades Calor GJ/año			Necesidades Electricidad GJ/año	Total GJ/año
	$Q_t$	$Q_p$	$Q_{in}$	$E_{in}$	
A	7,85	0,31	8,15	0,003	8,16
B	609,78	24,71	634,50	15,982	650,48
C	566,86	23,01	589,88	13,836	603,71
D	43,49	1,78	45,27	0,082	45,35
E	40888,70	772,32	41661,01	33490,162	75151,17
F	2571,28	104,26	2675,55	284,314	2959,86
G	649,56	26,34	675,89	18,142	694,03
H	250,64	10,19	260,83	2,710	263,54
I	877,52	35,60	913,13	33,134	946,26
J	308,58	12,51	321,09	4,095	325,19
K	337,51	13,67	351,18	4,893	356,07
L	3803,72	154,23	3957,95	622,157	4580,11
M	318,58	12,90	331,48	4,358	335,83
N	57154,46	772,32	57926,77	46812,744	104739,52
O	2199,52	89,20	2288,72	208,077	2496,80
P	2206,64	89,51	2296,15	209,473	2505,62
Q	2731,60	110,75	2842,35	320,834	3163,19
R	709,30	28,73	738,03	21,611	759,64
S	336,50	13,67	350,17	4,878	355,05
T	6119,47	248,14	6367,62	1610,418	7978,03
U	805,26	32,67	837,93	27,899	865,83
V	2415,00	97,93	2512,93	250,813	2763,74
W	3540,00	143,57	3683,57	539,009	4222,58

En la siguiente sección se analizará la cantidad de biogás producido por cada mercado y si esta es suficiente para cubrir las necesidades energéticas de cada planta o si, por el contrario, se requiere consumir energía de la tecnosfera.

#### 4.1.4. Salidas a la Tecnosfera

##### 4.1.4.1. Biogás

Como ya se ha visto, la digestión anaerobia de residuos orgánicos produce, a través de sus distintas etapas, una cantidad de biogás, que puede ser utilizada como combustible para producir energía eléctrica o calor. Para poder incorporar el biogás al modelo, es necesario conocer la cantidad de biogás que se genera en función de la cantidad y calidad de residuos orgánicos que son digeridos en el reactor. [5] Contiene datos experimentales

de producción de biogás para los sustratos de carne, pescado y verdura.

Tabla 4.3: Biogás producido a partir de la digestión anaerobia de carne, pescado y verdura [5]

	Verdura	Carne	Pescado
Nml/100 g	913,282	1337,585	769,239
Nm <sup>3</sup> /kg	91,328	133,756	76,924
m <sup>3</sup> /kg	0,021	0,031	0,018

Tabla 4.4: Contenido de metano en el biogás generado por cada tipo de sustrato [5]

% CH <sub>4</sub> en el biogás generado		
Verdura	Carne	Pescado
32,252	21,021	13,679

Con estos datos, y la cantidad de residuo entrante de cada tipo de sustrato para cada mercado, se obtiene el biogás anual producido en cada uno de ellos como la suma del biogás producido por cada uno de los sustratos por separado (ver Tabla 4.3). Además, conociendo el porcentaje de metano presente en el biogás de cada tipo de sustrato (Tabla 4.4), se puede obtener la cantidad anual de metano producida por cada merca.

$$B_{bruto} = B_C + B_V + B_P \quad (4.9)$$

Tabla 4.5: Producción bruta de biogás y metano por mercado en  $Nm^3/año$

	Biogás $Nm^3/año$				Metano $Nm^3/año$			
	V	C	P	Total	V	C	P	Total
A	0,00	0,00	13,73	<b>13,73</b>	0,00	0,00	1,88	1,88
B	1267,04	0,00	0,00	<b>1267,04</b>	408,65	0,00	0,00	408,65
C	1177,86	0,00	0,00	<b>1177,86</b>	379,88	0,00	0,00	379,88
D	55,22	0,00	29,60	<b>84,82</b>	17,81	0,00	4,05	21,86
E	52697,33	8152,51	19022,53	<b>79872,37</b>	16995,94	1713,74	2602,09	21311,77
F	3399,94	0,00	1636,40	<b>5036,35</b>	1096,55	0,00	223,84	1320,39
G	674,84	0,00	568,41	<b>1243,25</b>	217,65	0,00	77,75	295,40
H	520,79	0,00	0,00	<b>520,79</b>	167,97	0,00	0,00	167,97
I	1094,02	0,00	614,31	<b>1708,33</b>	352,84	0,00	84,03	436,88
J	433,24	0,00	175,16	<b>608,39</b>	139,73	0,00	23,96	163,69
K	453,78	0,00	208,48	<b>662,26</b>	146,35	0,00	28,52	174,87
L	4902,23	758,40	1769,59	<b>7430,22</b>	1581,07	159,42	242,06	1982,55
M	471,23	0,00	160,65	<b>631,88</b>	151,98	0,00	21,98	173,96
N	67476,70	9093,48	34100,56	<b>110670,74</b>	21762,58	1911,54	4664,62	28338,74
O	2964,51	0,00	1352,51	<b>4317,03</b>	956,11	0,00	185,01	1141,13
P	2843,91	439,97	1026,59	<b>4310,47</b>	917,22	92,49	140,43	1150,13
Q	5058,95	519,64	0,00	<b>5578,59</b>	1631,61	109,23	0,00	1740,85
R	967,19	0,00	426,72	<b>1393,91</b>	311,94	0,00	58,37	370,31
S	699,21	0,00	0,00	<b>699,21</b>	225,51	0,00	0,00	225,51
T	7886,77	1220,12	2846,94	<b>11953,84</b>	2543,64	256,48	389,43	3189,56
U	1673,22	0,00	0,00	<b>1673,22</b>	539,65	0,00	0,00	539,65
V	5018,03	0,00	0,00	<b>5018,03</b>	1618,41	0,00	0,00	1618,41
W	4562,35	705,82	1646,90	<b>6915,06</b>	1471,45	148,37	225,28	1845,10

Pero, como se ha explicado previamente, el biogás producido en la digestión anaerobia es utilizado como combustible para la generación de calor que necesita el digestor y para la generación de electricidad de la propia planta. De esta manera, el biogás neto que se exporta de la planta será la diferencia del biogás bruto generado, el biogás requerido para las necesidades de electricidad calor, y el biogás que se emite al ambiente en forma de fugas (ver Sección Emisiones).

$$B_{neto} = B_{bruto} - B_{necesidades} - B_{fugas} \quad (4.10)$$

$$B_{necesidades} = B_{calor} + B_{electricidad} \quad (4.11)$$

Los datos de la Tabla 4.2 proporcionan la cantidad de energía anual demandada para generar electricidad y calor. Para obtener cuánto biogás se necesita para cubrir estas necesidades, se calcula el metano necesario para producir electricidad en un sistema de cogeneración, y el necesario para producir calor en la caldera de dicho sistema.

$$B_{calor} = \frac{Q_{in}}{\eta_{caldera} \cdot PCI_{CH_4} \cdot NTP_{CH_4}} \quad (4.12)$$

$$B_{electricidad} = \frac{E_{in}}{\eta_{generador} \cdot PCI_{CH_4} \cdot NTP_{CH_4}} \quad (4.13)$$

- $\eta_{caldera}$ : Rendimiento de la caldera
- $\eta_{generador}$ : Rendimiento del generador
- $PCI_{CH_4}$ : Poder calorífico inferior del metano [ $GJ/kg$ ]
- $NTP_{CH_4}$ : Densidad del metano en condiciones normales de presión y temperatura

La Tabla 4.6 muestra los resultados finales de metano y biogás neto tras aplicar las necesidades energéticas y las fugas correspondientes (el cálculo de las fugas se detalla en la sección 4.1.5). Los valores negativos indican que la planta no es autosuficiente y que, por tanto, necesitará utilizar gas natural para cubrir parte de sus necesidades. Por otro lado, un balance de biogás neto positivo, indica que la planta exporta energía a la tecnosfera.

Tabla 4.6: Producción neta anual de biogás por mercado en  $Nm^3/año$

	Metano bruto	Nec. Calor	Nec. Elec.	Metano producido	Biogas producido	Fugas	Biogás neto
A	1,88	2,87	0,002	-0,996	-7,278	0,316	-7,59
B	408,65	223,49	9,570	175,583	544,411	29,142	515,27
C	379,88	207,78	8,285	163,822	507,944	27,091	480,85
D	21,86	15,94	0,049	5,866	22,763	1,951	20,81
E	21311,77	14674,54	20053,989	-13416,752	-50283,367	1837,065	-52120,43
F	1320,39	942,43	170,248	207,720	792,302	115,836	676,47
G	295,40	238,07	10,863	46,465	195,557	28,595	166,96
H	167,97	91,87	1,623	74,468	230,894	11,978	218,92
I	436,88	321,64	19,841	95,399	373,042	39,292	333,75
J	163,69	113,10	2,452	48,134	178,906	13,993	164,91
K	174,87	123,70	2,930	48,243	182,703	15,232	167,47
L	1982,55	1394,13	372,549	215,868	809,030	170,895	638,14
M	173,96	116,76	2,609	54,588	198,287	14,533	183,75
N	28338,74	20403,94	28031,583	-20096,778	-78483,560	2545,427	-81028,99
O	1141,13	806,17	124,597	210,357	795,809	99,292	696,52
P	1150,13	808,79	125,433	215,910	809,190	99,141	710,05
Q	1740,85	1001,18	192,116	547,547	1754,631	128,308	1626,32
R	370,31	259,96	12,941	97,409	366,666	32,060	334,61
S	225,51	123,34	2,921	99,243	307,712	16,082	291,63
T	3189,56	2242,91	964,322	-17,674	-66,239	274,938	-341,18
U	539,65	295,15	16,706	227,792	706,287	38,484	667,80
V	1618,41	885,15	150,187	583,082	1807,893	115,415	1692,48
W	1845,10	1297,49	322,760	224,848	842,688	159,046	683,64

#### 4.1.4.2. Digestato

El digestato es el residuo sólido-líquido que queda después del proceso de digestión anaerobia de residuos orgánicos en el digestor. Es una mezcla de material orgánico parcialmente digerido, así como agua, sales minerales y microorganismos que han participado en el proceso de digestión anaerobia, por lo que depende directamente de la cantidad y composición de residuos orgánicos que se introducen en el digestor. De acuerdo con datos experimentales, el digestato conforma un 66 % de la masa entrante de residuos [27], y su composición en función del tipo de residuo digerido se distribuye de acuerdo con la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Composición del digestato en función de la composición de los residuos orgánicos [4]

	Verdura	Pescado	Carne
<b>pH</b>	6,3	8,1	5,3
<b>dm [%]</b>	56%	44%	69%
<b>Humedad [%]</b>	45%	56%	31%
<b>Humedad [g/kg digestato]</b>	666	730	476
<b>COT [g/kg digestato]</b>	255	74	351
<b>N [g/kg digestato]</b>	20	150	55
<b>P [g/kg digestato]</b>	3	6	6
<b>K [g/kg digestato]</b>	31	26	52
<b>S [g/kg digestato]</b>	2	0	23
<b>Ca [g/kg digestato]</b>	12	6	26
<b>Mg [g/kg digestato]</b>	5	5	10
<b>Fe [g/kg digestato]</b>	6	3	1

Con esta información y, conociendo la cantidad de pescado, carne y verdura que tratan los digestores de cada merca, se puede obtener la cantidad (Tabla 4.8) y composición (Tabla 4.9) de digestato anual que tendrá cada mercado. A la hora de realizar el modelo de cada merca, se definirá un material llamado digestato con la composición de cada una, y en la cantidad detallada por estas tablas.

Tabla 4.8: Cantidad de digestato anual producido en cada merca

	Sustrato entrante [ton/año]	Digestato producido [ton/año]	dm (masa seca) [%]	Humedad [%]	Humedad [g/kg d]
A	1,79	1,19	0,44	0,56	730
B	138,74	92,49	0,56	0,45	666
C	128,97	85,98	0,56	0,45	666
D	9,89	6,60	0,5132	0,4929	690,96
E	9302,82	6201,88	0,5419	0,4643	662,38
F	585,01	390,01	0,5168	0,4896	689,04
G	147,78	98,52	0,5	0,505	698
H	57,02	38,02	0,56	0,45	666
I	199,65	133,10	0,512	0,494	691,6
J	70,21	46,81	0,5216	0,4852	686,48
K	76,79	51,19	0,518	0,4885	688,4
L	865,41	576,94	0,5419	0,4643	662,38
M	72,48	48,32	0,5252	0,4819	684,56
N	13003,54	8669,03	0,5309	0,4748	670,66
O	500,43	333,62	0,518	0,4885	688,4
P	502,05	334,70	0,5419	0,4643	662,38
Q	621,48	414,32	0,5743	0,4346	645,1
R	161,38	107,58	0,5192	0,4874	687,76
S	76,56	51,04	0,56	0,45	666
T	1392,28	928,18	0,5419	0,4643	662,38
U	183,21	122,14	0,56	0,45	666
V	549,45	366,30	0,56	0,45	666
W	805,41	536,94	0,5419	0,4643	662,38

Tabla 4.9: Composición elemental del digestato de cada marca según la composición del sustrato empleado

	pH	COT [g/kg d]	N [g/kg d]	P [g/kg d]	K [g/kg d]	S [g/kg d]	Ca [g/kg d]	Mg [g/kg d]	Fe [g/kg d]
A	8,1	74	150	6	26	0	6	5	3
B	6,3	255	20	3	31	2	12	5	6
C	6,3	255	20	3	31	2	12	5	6
D	7,002	184,41	70,7	4,17	29,05	1,22	9,66	5	4,83
E	6,676	216,69	58,95	4,14	31,96	3,77	11,92	5,55	4,64
F	6,948	189,84	66,8	4,08	29,2	1,28	9,84	5	4,92
G	7,2	164,5	85	4,5	28,5	1	9	5	4,5
H	6,3	255	20	3	31	2	12	5	6
I	7,02	182,6	72	4,2	29	1,2	9,6	5	4,8
J	6,876	197,08	61,6	3,96	29,4	1,36	10,08	5	5,04
K	6,93	191,65	65,5	4,05	29,25	1,3	9,9	5	4,95
L	6,676	216,69	58,95	4,14	31,96	3,77	11,92	5,55	4,64
M	6,822	202,51	57,7	3,87	29,55	1,42	10,26	5	5,13
N	6,822	202,1	67,35	4,29	31,19	3,21	11,22	5,45	4,53
O	6,93	191,65	65,5	4,05	29,25	1,3	9,9	5	4,95
P	6,676	216,69	58,95	4,14	31,96	3,77	11,92	5,55	4,64
Q	6,19	265,56	23,85	3,33	33,31	4,31	13,54	5,55	5,45
R	6,912	193,46	64,2	4,02	29,3	1,32	9,96	5	4,98
S	6,3	255	20	3	31	2	12	5	6
T	6,676	216,69	58,95	4,14	31,96	3,77	11,92	5,55	4,64
U	6,3	255	20	3	31	2	12	5	6
V	6,3	255	20	3	31	2	12	5	6
W	6,676	216,69	58,95	4,14	31,96	3,77	11,92	5,55	4,64

#### 4.1.5. Emisiones

Durante el proceso de digestión anaerobia de residuos orgánicos, pueden ocurrir emisiones de gases como el metano ( $CH_4$ ) y el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), que son los principales componentes del biogás producido. Estas emisiones pueden ocurrir durante la operación del digestor, en la fase de almacenamiento del digestato, en la gestión del efluente líquido, y en la utilización del biogás producido como combustible. Se definen como 'emisiones fugitivas' o fugas de biogás. La Tabla 4.10 muestra el estado del arte del análisis de fugas en digestores anaerobios:

Tabla 4.10: Emisiones fugitivas de metano en plantas de biogás

Fuente	Sustrato	Emisiones [% biogás producido]	País	Año
[28]	Estiércol	5,5-3,8 %	Canadá	2022
[29]	Cultivos Energéticos Estiércol líquido	4 %	Alemania	2015
[30]	5 plantas con distintos sustratos	3 %	Austria	2015
[31]	Estiércol de ganado Piensos orgánicos	3,1 %	Canadá	2011
[32]	Estiércol de ganado Aguas residuales	5,04 %	Australia	2022
[33]	4 plantas de residuos alimentarios	media 2,3 %	Reino Unido	2021

Como se puede ver, el porcentaje de emisiones de metano producidas depende fuertemente de las instalaciones y lugar en la que se sitúa la planta, así como el sustrato que esta digiere. Por este motivo, se tomarán como referencia los resultados de [33], 2,3 % de fugas de biogás, ya que proporciona la media de fugas de varias plantas que tratan residuos alimentarios orgánicos en Reino Unido, siendo este el caso más cercano al que se trata en este estudio.

Conociendo la cantidad total de biogás fugado (2,3 %) y la composición del biogás para cada mercado [5], se obtiene el siguiente desglose de gases emitidos a la atmósfera anualmente por los digestores de cada mercado (ver Tabla 4.11). Estos valores de emisiones han de ser tenidos en cuenta como pérdidas de biogás en el balance energético de la sección 4.1.3, ya que es biogás producido pero no aprovechable para generar calor ni electricidad.

Tabla 4.11: Emisiones de gases a la atmósfera en  $Nm^3/año$

	Fugas de biogás	Fugas CH <sub>4</sub>	Fugas H <sub>2</sub> S	Fugas CO <sub>2</sub>
A	0,316	0,043	0,006	0,266
B	29,142	9,399	0,583	19,160
C	27,091	8,737	0,542	17,812
D	1,951	0,503	0,039	1,409
E	1837,065	490,171	36,741	1310,152
F	115,836	30,369	2,317	83,150
G	28,595	6,794	0,572	21,229
H	11,978	3,863	0,240	7,875
I	39,292	10,048	0,786	28,458
J	13,993	3,765	0,280	9,948
K	15,232	4,022	0,305	10,905
L	170,895	45,599	3,418	121,878
M	14,533	4,001	0,291	10,242
N	2545,427	651,791	50,909	1842,727
O	99,292	26,246	1,986	71,060
P	99,141	26,453	1,983	70,705
Q	128,308	40,039	2,566	85,702
R	32,060	8,517	0,641	22,902
S	16,082	5,187	0,322	10,573
T	274,938	73,360	5,499	196,080
U	38,484	12,412	0,770	25,303
V	115,415	37,224	2,308	75,883
W	159,046	42,437	3,181	113,428

## 4.1.6. Residuos

### 4.1.6.1. Residuos sólidos

Cuando se introducen en el digestor materiales que no son orgánicos y que no han podido ser digeridos por los microorganismos, estos son expulsados con el digestato. Este es el caso de plásticos y otros materiales de embalaje que contuviesen los residuos orgánicos. Como no se tienen datos de la proporción o cantidad de estos materiales que acaba en el digestor, se supondrá que se realiza una correcta clasificación de residuos en los mercados, evitando así la presencia de residuos sólidos inorgánicos a la salida del digestor.

## 4.2. Proceso de Post-tratamiento del Digestato

Una vez se han descompuesto los residuos orgánicos y se ha producido el biogás, los nutrientes, residuos sólidos y fibras salen del reactor en forma de digestato. Pero este digestato tiene un gran contenido en humedad, por lo que su almacenamiento y manejo como fertilizante es complicado. Por este motivo, el digestato ha de pasar por un proceso de post-tratamiento que lo adecue para su uso en suelos.

Como muestran los datos de la Tabla 4.8, el digestato saliente del reactor tiene un gran contenido en humedad. Por este motivo, el primer paso del post-tratamiento es la separación de las fracciones sólida y líquida del digestato. Como ya se ha mencionado con anterioridad, parte de la fracción líquida se separa del digestato y es re-introducida al reactor anaerobio para que actúe como regulador de pH.

Una vez realizada la separación, el digestato resultante sigue teniendo un contenido de humedad considerable y todavía no se encuentra en condiciones óptimas para su empleo en suelos, por lo que se somete a un proceso de compostaje: una técnica biológica, aérea y controlada de estabilización y tratamiento de residuos orgánicos biodegradables, tanto sólidos como semisólidos. Durante este proceso, los residuos alcanzan temperaturas que eliminan gérmenes, parásitos, vectores de enfermedad, y semillas de malas hierbas [34]. A continuación, se detallan las fases del proceso de compost con el fin de tener una mejor comprensión del mismo:

- **Fase Mesófila:** Los organismos se aclimatan al digestato, el cual colonizan a través de la multiplicación. La aclimatación dura de 2 a 8 días, en los cuales la temperatura es parecida a la del ambiente. Una vez los microorganismos empiezan a descomponer moléculas sencillas para reproducirse, aumenta la temperatura hasta alcanzar los 50 – 70°C, y el pH hasta valores cercanos a 4.
- **Fase Termófila o de Higienización:** Comienza al superar los 45°C en la fase mesófila. En esta fase, los microorganismos termófilos descomponen fuentes de carbono complejas (celulosa, lignina, ceras y proteínas complejas). Durante esta fase, la mezcla se ha de airear con frecuencia para aportar oxígeno a los microorganismos con el fin de que sigan degradando las moléculas, y la temperatura se mantiene estable, lo que permite eliminar (pasteurizar) patógenos y hongos.
- **Fase de Enfriamiento:** Una vez los microorganismos ya han degradado todas las moléculas complejas, la temperatura de la mezcla desciende hasta los 40 – 45°C. A partir de este momento, se produce una segunda degradación por parte de los microorganismos mesófilos, que terminan de degradar la totalidad de la mezcla.
- **Fase de Maduración:** Esta es la fase que marca la duración del proceso de compost, ya que puede durar varios meses. En ella, se produce una fermentación lenta en la que se degrada la fracción biodegradable de la mezcla, hasta que esta vuelve a alcanzar la temperatura ambiente.

A continuación, se detallan las entradas y salidas necesarias para completar el inventario de ACV del post-tratamiento del digestato (compostaje), de acuerdo con el proceso mostrado en la Figura [4.1](#):

#### 4.2.1. Entradas de la Naturaleza

Como en el caso de la digestión anaerobia, el post-tratamiento del digestato no emplea materias primas que no han sido transformadas por procesos productivos, por lo que este proceso no tiene entradas de la naturaleza.

#### 4.2.2. Entradas de la Tecnosfera: Materiales y Combustibles

##### 4.2.2.1. Digestato

El digestato que se somete al proceso de pos-tratamiento o compost es aquel que sale del digestor anaerobio y es sometido a una separación preliminar de las fases sólida y líquida para poder realimentar la fase líquida al proceso de digestión anaerobia con el fin de regular el pH y la velocidad de las reacciones biológicas (ver Sección [4.1.2.2](#)).

La práctica de recirculación de la fracción líquida del digestato está muy repartida en la industria del biogás, pero es ejecutada de diferentes maneras según el lugar y el sustrato tratado en cada caso, y del posterior uso que se quiera dar al digestato resultante. En el caso del digestato utilizado como material para compost, es necesario que este tenga una humedad inferior al 60 % [\[35\]](#). Adicionalmente, [\[36\]](#) indica que una recirculación del 30 % de la humedad del digestato saliente es óptima para la producción de biometano en los digestores.

Con el fin de generalizar el estudio para los 23 casos estudiados y, aunque dependiendo del sustrato varía la fracción óptima del digestato recirculado, se tomará una recirculación del 30 % de la humedad del digestato saliente del digestor y, por lo tanto, el digestato entrante al proceso de compost será el saliente del digestor restándole el 30 % de la humedad. La Tabla [4.12](#) muestra la cantidad de digestato entrante al proceso de compost, tras la recirculación de la fracción líquida:

##### 4.2.2.2. Planta de Compostaje

Al igual que en el proceso de digestión anaerobia, es necesario tener en cuenta los impactos ambientales de construcción de la infraestructura que permite realizar el proceso de compost, la planta de compostaje. En este caso, al igual que con el digestor, se empleará la infraestructura de compost ya existente en la base de datos de Ecoinvent 'Composting facility construction CH', la cual tiene capacidad para tratar 10000 toneladas de sustrato anuales durante una vida útil de 25 años.

Tabla 4.12: Digestato entrante al proceso de compost en *ton/año*

	Digestato de la DA [ton/año]	Humedad [g/kg digestato]	Digestato a post-tratamiento [ton/año]
A	1,193	730	0,932
B	92,493	666	74,013
C	85,980	666	68,801
D	6,593	690,96	5,227
E	6201,880	662,38	4969,480
F	390,007	689,04	309,388
G	98,520	698	77,890
H	38,013	666	30,418
I	133,100	691,6	105,484
J	46,807	686,48	37,167
K	51,193	688,4	40,621
L	576,940	662,38	462,294
M	48,320	684,56	38,397
N	8669,027	670,66	6924,836
O	333,620	688,4	264,721
P	334,700	662,38	268,190
Q	414,320	645,1	334,137
R	107,587	687,76	85,389
S	51,040	666	40,842
T	928,187	662,38	743,743
U	122,140	666	97,736
V	366,300	666	293,113
W	536,940	662,38	430,243

#### 4.2.2.3. Tractor

En la fase termófila del compost es necesario airear frecuentemente el sustrato para no ahogar a los microorganismos que se encargan de la descomposición de moléculas complejas. Generalmente, esta aireación se lleva a cabo con un tractor equipado con una pala, que sea capaz de recoger y transportar sustrato de un lado a otro.

Al igual que con la planta de compostaje, es necesario conocer las horas de uso de la herramienta para poder atribuir la fracción correcta de su impacto medioambiental al proceso de compost, así como el impacto derivado de la combustión en el motor de la máquina (consumo de recursos fósiles, emisiones, etc.). Como el empleo del tractor no está estandarizado, en este estudio se empleará el tiempo y tipología de tractor (ver Tabla

4.13) que especifica la base de datos Ecoinvent para 1 tonelada de sustrato compostado en el proceso 'Biowaste CH treatment of biowaste, Industrial Composting.Conseq U'.

Tabla 4.13: Parámetros para definir el impacto derivado del uso del tractor

<b>Combustible</b>	Diesel
<b>Tamaño</b>	$\geq 74,57$ kW
<b>Factor de carga</b>	Bajo
<b>Horas uso</b>	3,52 h/ton

### 4.2.3. Entradas de la Tecnosfera: Electricidad y Calor

#### 4.2.3.1. Electricidad

El proceso de compost no es un proceso intensivo en electricidad, pero es necesario tener en cuenta los consumos eléctricos de la planta y otras herramientas que se puedan utilizar. De nuevo, con el fin de estandarizar los 23 procesos del estudio, se utilizará el consumo de electricidad por tonelada (11,8 kWh/tonelada) de sustrato que indica el proceso 'Biowaste CH treatment of biowaste, Industrial Composting.Conseq U' de la base de datos de Ecoinvent.

### 4.2.4. Salidas a la Tecnosfera

#### 4.2.4.1. Biofertilizante

El producto resultante del proceso de compost será, a partir de ahora, referido como biofertilizante. Este es el producto final al que se van a atribuir los impactos recopilados en el inventario del ACV.

La composición del biofertilizante es la resultante del balance de masas de los componentes del digestato entrante y las emisiones que tienen lugar durante el compost. La Tabla 4.14 resume la composición del biofertilizante para cada uno de los casos estudiados:

### 4.2.5. Emisiones

Las emisiones que se producen durante un proceso de compost varían sustancialmente en función del sustrato a compostar, y si este ha sufrido transformaciones previas (como un proceso de D.A.). En el caso del digestato de las mercas, se han de evaluar las emisiones del compostaje del digestato de la fracción orgánica alimentaria, por lo que se tomará la caracterización de gases emitidos del proceso de compost de la base de datos Ecoinvent como referencia para determinar las emisiones que el digestato produce al aire durante su proceso de compost. Las emisiones para cada uno de los procesos tratados se muestran en la Tabla 4.15.

Tabla 4.14: Composición de nutrientes del biofertilizante

	N [g/kg biofert]	P [g/kg biofert]	K [g/kg biofert]	Biofertilizante [ton/año]
A	150	6	26	0,72
B	20	3	31	57,09
C	20	3	31	53,07
D	70,7	4,17	29,05	4,03
E	58,95	4,14	31,96	3833,08
F	66,8	4,08	29,2	238,64
G	85	4,5	28,5	60,08
H	20	3	31	23,46
I	72	4,2	29	81,36
J	61,6	3,96	29,4	28,67
K	65,5	4,05	29,25	31,33
L	58,95	4,14	31,96	356,58
M	57,7	3,87	29,55	29,62
N	67,35	4,29	31,19	5341,29
O	65,5	4,05	29,25	204,19
P	58,95	4,14	31,96	206,86
Q	23,85	3,33	33,31	257,73
R	64,2	4,02	29,3	65,86
S	20	3	31	31,50
T	58,95	4,14	31,96	573,67
U	20	3	31	75,39
V	20	3	31	226,09
W	58,95	4,14	31,96	331,86

Tabla 4.15: Emisiones producidas durante el proceso de compost

	Emisiones NH3 [kg]	Emisiones CO2 [kg]	Emisiones N2O [kg]	Emisiones H2S [kg]	Emisiones CH4 [kg]	Emisiones Agua [kg]
A	6,52	205,04	0,02	0,49	0,93	0,12
B	518,09	16282,90	1,85	38,93	74,01	9,25
C	481,61	15136,26	1,72	36,19	68,80	8,60
D	36,59	1149,86	0,13	2,75	5,23	0,65
E	34786,36	1093285,52	124,24	2613,95	4969,48	621,18
F	2165,71	68065,27	7,73	162,74	309,39	38,67
G	545,23	17135,78	1,95	40,97	77,89	9,74
H	212,93	6692,02	0,76	16,00	30,42	3,80
I	738,39	23206,57	2,64	55,48	105,48	13,19
J	260,17	8176,77	0,93	19,55	37,17	4,65
K	284,35	8936,59	1,02	21,37	40,62	5,08
L	3236,06	101704,67	11,56	243,17	462,29	57,79
M	268,78	8447,26	0,96	20,20	38,40	4,80
N	48473,85	1523463,88	173,12	3642,46	6924,84	865,60
O	1853,05	58238,58	6,62	139,24	264,72	33,09
P	1877,33	59001,89	6,70	141,07	268,19	33,52
Q	2338,96	73510,06	8,35	175,76	334,14	41,77
R	597,72	18785,48	2,13	44,91	85,39	10,67
S	285,90	8985,29	1,02	21,48	40,84	5,11
T	5206,20	163623,46	18,59	391,21	743,74	92,97
U	684,15	21502,01	2,44	51,41	97,74	12,22
V	2051,79	64484,92	7,33	154,18	293,11	36,64
W	3011,70	94653,35	10,76	226,31	430,24	53,78

### 4.3. Construcción del Inventario en Simapro

Una vez se han recopilado todos los datos necesarios para realizar el inventario del ACV, estos han de ser correctamente introducidos en la calculadora de impactos (Simapro) para obtener un resultado final correcto. Tal y como se ha hecho con el inventario, este paso se divide en dos grandes procesos, la D.A. y el compost, cuyas entradas y salidas vienen representadas en la Figura 4.3.

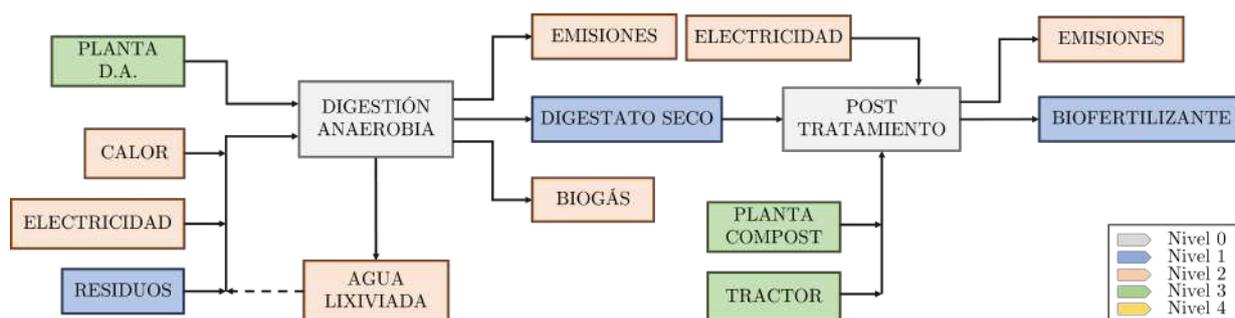


Figura 4.3: Niveles del inventario del ACV

A continuación, se detallará la construcción del inventario de análisis de ciclo de vida para cada uno de los subprocesos identificados:

#### 4.3.1. Digestión Anaerobia

La Figura 4.4 muestra cómo se ha introducido el inventario para poder simular los procesos de Digestión Anaerobia. La Figura muestra el esquema genérico 'Digestato X' que toman todos los casos estudiados.

##### 4.3.1.1. Asignación de Impactos

En el caso de la Digestión Anaerobia, se trata un proceso que tiene dos productos a su salida: el biogás y el digestato. En un marco de análisis de ciclo de vida, cuando existen más de dos productos en un proceso, se ha de decidir qué porcentaje de los impactos ambientales se atribuye a cada uno de los productos.

Existen tres maneras de realizar la asignación de impactos:

1. Asignación por masa: El porcentaje de asignación a cada producto coincidirá con el porcentaje total que ese producto conforma de la masa total producida. Es el caso más común en los A.C.V..
2. Asignación económica: el método de ponderación para obtener la asignación depende del valor de mercado de cada producto.
3. Asignación energética: la asignación se realiza en función del poder energético (en J) que posea la misma cantidad de cada producto.

El caso del biogás y el digestato, al ser materiales de naturaleza muy distinta, impide realizar una correcta asignación por masa. Esto se debe a que, aunque el biogás es el producto principal del proceso de D.A., es mucho más ligero en masa que el digestato, por lo que se le atribuiría cerca del 100 % de los impactos del proceso al digestato de manera errónea (ya que el producto principal es el biogás y el digestato sería, a lo sumo, un sub-producto). Con la asignación energética pasa algo similar, ya que la naturaleza del digestato hace que este no sea utilizado con fines energéticos (salvo ocasional valorización energética en horno de clínker).

Ante estos problemas con las asignaciones energética y de masa, se ha realizado una asignación económica de los impactos del proceso de D.A., tomando los siguientes precios de biogás y digestato:

- Precio del biogás: 0,312 €/m<sup>3</sup>. Este precio es derivado de los análisis del precio del biogás de la Agencia Internacional de la Energía [37].
- Precio del digestato: 4 €/tonelada. Se ha llegado a este precio tras estudiar diferentes fuentes sobre la predicción del futuro precio del digestato utilizado como fertilizante [38] [39] (ya que, a día de hoy, el digestato tiene precios hasta negativos al ser considerado residuo [40]).

Con estos precios, se han calculado los hipotéticos beneficios económicos anuales generados a través de la venta de biogás y de digestato, otorgando a cada uno una asignación económica proporcional al beneficio proporcionado por cada material. La asignación económica resultante se muestra en la Tabla 4.16.

### 4.3.2. Inserción de los residuos vegetales (fruta y verdura)

Como se puede ver en la Tabla 4.4, los flujos de residuos de carne y de pescado están disponibles en la base de datos Ecoinvent 3, por lo que se pueden añadir directamente al inventario. Sin embargo, esto no sucede con la fruta, verdura, ya que no existe en la base de datos ningún residuo de este tipo.

En ausencia del residuo vegetal en la base de datos de Ecoinvent y otras bases de datos utilizadas por SimaPro, se debe generar manualmente el residuo mediante la inclusión de los productos vegetales existentes. Con este propósito, se ha desarrollado un proceso que considera todos los productos vegetales (frutas y verduras) presentes en la base de datos de Ecoinvent y disponibles en los mercados de frutas y verduras, con el fin de representar la diversidad de residuos presentes en dichos mercados.

### 4.3.3. Compost

La Figura 4.5 muestra cómo se ha introducido el inventario para poder simular el proceso de compost. La Figura muestra el esquema genérico 'Biofertilizante X' que toman

todos los casos estudiados.

Tabla 4.16: Asignación Económica del inventario de la digestión anaerobia

	Biogás neto Nm3/año	Precio biogas anual €	digestato neto ton/año	Precio anual digestato €	Asignación Económica	
					Biogas	Digestato
A	13,73	4,28	0,932	3,728	53%	47%
B	1267,04	395,14	74,013	296,053	57%	43%
C	1177,86	367,32	68,801	275,205	57%	43%
D	84,82	26,45	5,227	20,906	56%	44%
E	79872,37	24908,83	4969,480	19877,918	56%	44%
F	5036,35	1570,62	309,388	1237,550	56%	44%
G	1243,25	387,72	77,890	311,560	55%	45%
H	520,79	162,41	30,418	121,673	57%	43%
I	1708,33	532,76	105,484	421,938	56%	44%
J	608,39	189,73	37,167	148,668	56%	44%
K	662,26	206,53	40,621	162,484	56%	44%
L	7430,22	2317,17	462,294	1849,176	56%	44%
M	631,88	197,06	38,397	153,586	56%	44%
N	110670,74	34513,55	6924,836	27699,343	55%	45%
O	4317,03	1346,30	264,721	1058,883	56%	44%
P	4310,47	1344,25	268,190	1072,762	56%	44%
Q	5578,59	1739,73	334,137	1336,547	57%	43%
R	1393,91	434,70	85,389	341,554	56%	44%
S	699,21	218,05	40,842	163,369	57%	43%
T	11953,84	3727,90	743,743	2974,972	56%	44%
U	1673,22	521,81	97,736	390,946	57%	43%
V	5018,03	1564,91	293,113	1172,453	57%	43%
W	6915,06	2156,52	430,243	1720,970	56%	44%

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos		Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categoría
Digestato_N		Digestato_N = 6,92E3	ton	Mass	45 %	no definido	Waste\Transformation
Biogas_N		Biogas_N = 0	m3	Volume	55 %		Fuels\Biofuels\Biogas
(Insertar línea aquí)							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)		Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx
Meat and bone meal [CH] treatment of slaughterhouse waste, rendering   Cut-off, U		Carne_N = 1,18E3	ton				
Fish residues [GLO] fish residues, Recycled Content cut-off   Cut-off, U		Pescado_N = 4,4E3	ton				
Anaerobic digestion plant, agriculture, with methane recovery [CH] construction   Cut-off, U		amortiz_anual =	p				
Verdura_X		Verdura_N = 7,39E3	ton				
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx
Electricity, high voltage [ES] market for   Cut-off, U		Electr_N = 1,93E7	kWh				
(Insertar línea aquí)							
Salidas							
Emisiones al aire		Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín
Methane			F_CH4_N = 652	kg			
Hydrogen sulfide			F_H2S_N = 50,9	kg			
Carbon dioxide			F_CO2_N = 1,84E3	kg			
(Insertar línea aquí)							

Figura 4.4: Proceso Digestato X en SimaPro

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación %	Tipo de residuo	Categoría	
Biofertilizante organico_N (Insertar línea aquí)	Biofertilizante_N	ton	Mass	100 %	no definido	Chemicals	
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx
Digestato_N		Digestato_N = 6,	ton				
Composting facility, open [CH] construction   Cut-off, U		Amortizacion_co	p				
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, low load factor [GLO] market for   Cut-off, U		Uso_tractor*Dige	hr				
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx
Electricity, low voltage [ES] market for   Cut-off, U		Electricidad_com	kWh				
(Insertar línea aquí)							
Salidas							
Emisiones al aire	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2*DS	Mín	Máx
Ammonia		Factor_NH3*Digestato_N = 4,85E4	kg				
Carbon dioxide, biogenic		Factor_CO2*Digestato_N = 1,52E6	kg				
Dinitrogen monoxide		Factor_N2O*Digestato_N = 173	kg				
Hydrogen sulfide		Factor_H2S*Digestato_N = 3,64E3	kg				
Methane, biogenic		Factor_CH4*Digestato_N = 6,92E3	kg				
Water/m3		Factor_agua*Digestato_N = 866	m3				
(Insertar línea aquí)							

Figura 4.5: Proceso Biofertilizante X en SimaPro

# Capítulo 5

## Resultados obtenidos

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para los impactos de cada uno de los casos estudiados bajo el método de cálculo CML. En este capítulo sólo se incluyen representaciones gráficas de los datos. Los resultados brutos obtenidos se encuentran detallados en el Anexo [B](#).

### 5.1. Resultados globales por categoría de impacto

A lo largo de esta sección, se analizarán los resultados obtenidos para cada una de las diez categorías a analizar. Para cada una de ellas, se detallarán los resultados globales (contando con los impactos de la infraestructura), y excluyendo los impactos de la infraestructura empleada en los procesos productivos. También se ha realizado un análisis de la sensibilidad de los resultados obtenidos al dimensionamiento de la estructura, el cual se encuentra en el Anexo [C](#).

#### 5.1.1. Agotamiento de recursos naturales (Abiotic Depletion)

La Figura [5.1](#) muestra los resultados obtenidos para el agotamiento de recursos naturales en forma del factor ADP (Abiotic Depletion Potential). Analizando en profundidad las contribuciones del inventario a esta categoría de impacto para los distintos casos, se encuentra que el principal contribuyente es la extracción de materiales para construir las infraestructuras de D.A. y de compost.

En esta categoría, se puede apreciar que la mayoría de los casos se encuentran en un nivel similar, mientras que Blos mercados A y D se disparan. Esto se debe a que, habiendo utilizado la misma infraestructura estándar para todas los casos, los mercados A y D son los que menos volumen de residuos reciben y, por tanto, menos masa de digestato producen. De esta manera, estos dos casos tienen una mayor cantidad de infraestructura amortizada por kg de digestato producido, resultando en un mayor impacto sobre el agotamiento de los recursos naturales. La Figura [C.1](#), que muestra la contribución de la infraestructura al agotamiento de recursos en cada caso, confirma dicha hipótesis.

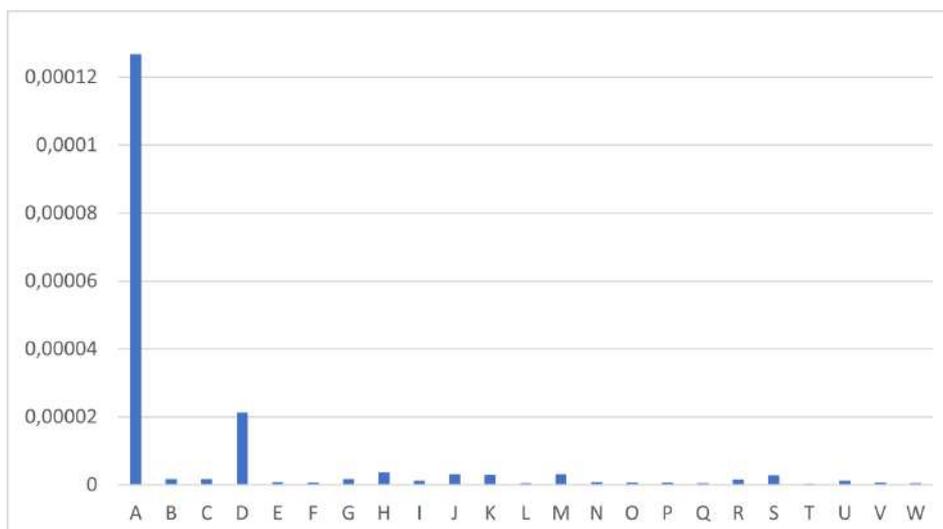


Figura 5.1: Comparación de resultados de agotamiento de recursos naturales (kg Sb eq.) para todos los mercados

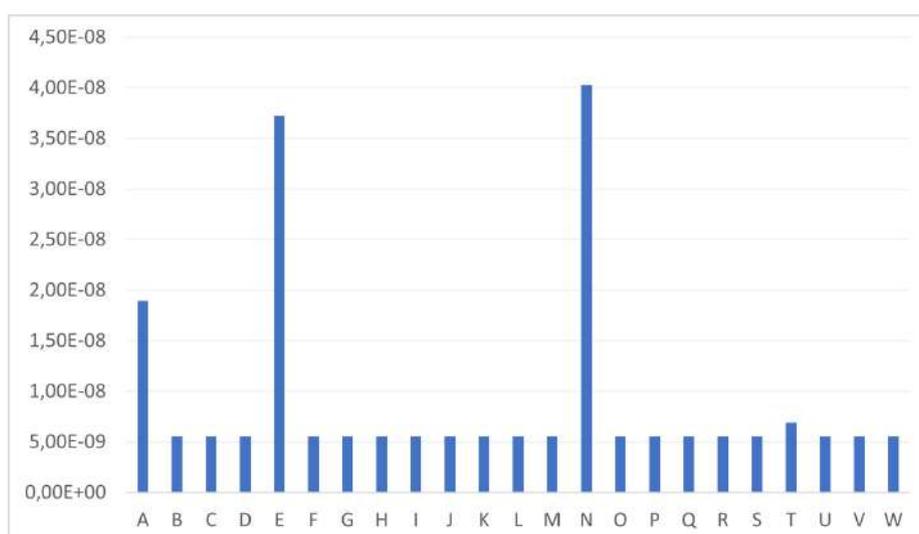


Figura 5.2: Resultados del agotamiento de recursos naturales (kg Sb eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados

#### 5.1.1.1. Análisis excluyendo la infraestructura

Una vez se excluye la infraestructura de los resultados (vease la Figura 5.2), se elimina la diferencia de resultados debido al dimensionamiento de las infraestructuras y se puede analizar el impacto en función de la calidad y cantidad de sustrato de cada mercado.

Con la infraestructura excluida, el mercado A reduce su impacto en un 84 %. Esto se debe a que, al retirar la infraestructura, y al sólo tratar residuos de pescado, las únicas

actividades que contribuyen al agotamiento de recursos son el empleo de electricidad y maquinaria. Es importante señalar que todos los mercados excepto 4 (Mercados A, E, N y T) muestran los mismos resultados. El motivo por el que destacan estos casos es que son los mercados que no tienen un proceso de digestión anaerobia autosuficiente, por lo que demandan electricidad de la red, incurriendo así en un consumo adicional que incrementa su demanda de recursos naturales.

### 5.1.2. Agotamiento de combustibles fósiles (Abiotic Depletion: Fossil Fuels)

La Figura 5.3 muestra los resultados obtenidos para el agotamiento de combustibles fósiles. La cantidad de impacto que se tiene en esta categoría depende, fundamentalmente, de los combustibles empleados para construir la infraestructura, y la electricidad y calor demandada a la red en los procesos de D.A. y post-tratamiento.

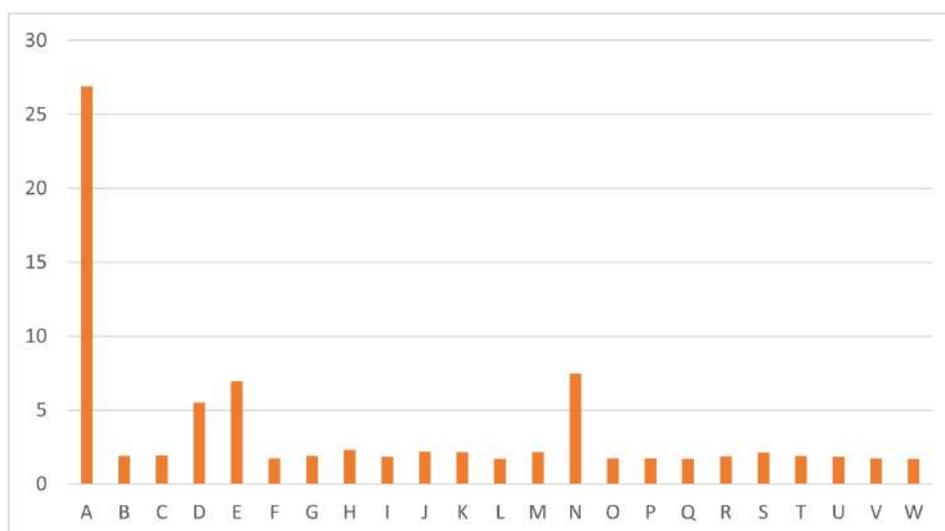


Figura 5.3: Comparación de resultados de agotamiento de combustibles fósiles (MJ) para todos los mercados

De nuevo, y por las mismas circunstancias que el caso anterior, el mercado A presenta valores muy distintos a los demás casos (véanse los impactos de la infraestructura de la Figura C.2). El mercado D presenta el mismo fenómeno, pero a menor escala, ya que trata un volumen de residuos inferior al mercado A, pero en el mismo orden de magnitud. De nuevo, esta hipótesis se confirma, con la significativa reducción del impacto en ambas mercas (87 % y 74 % respectivamente) si se excluye el impacto de la infraestructura.

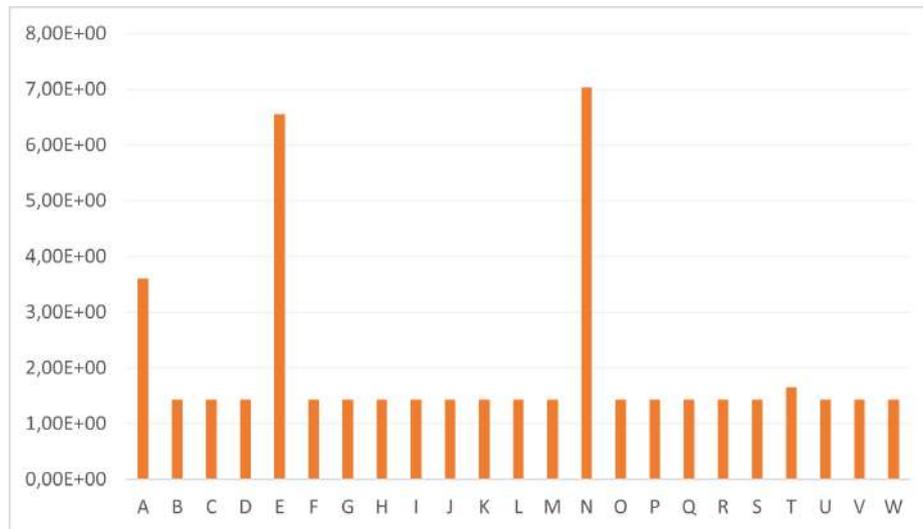


Figura 5.4: Resultados del agotamiento de combustibles fósiles (MJ) excluyendo la infraestructura para todos los mercados

#### 5.1.2.1. Análisis excluyendo la infraestructura

Los casos que se ven menos afectados por la exclusión de la infraestructura son los mercados E y N. Esto se debe a que son las mercas con mayor volumen de residuos, por lo que el impacto de infraestructura por kg de biofertilizante es el más reducido. Al excluir la infraestructura (Figura 5.4), se obtiene un resultado homogéneo en todas los casos en los cuatro mercados cuyos digestores no son autosuficientes.

El motivo por el que despuntan estos casos es por el funcionamiento de sus respectivos procesos de D.A., ya que son los casos en los que la D.A. no es autosuficiente y el proceso requiere energía de la red para poder digerir los residuos. En el caso de los mercados E y N, la gran cantidad de residuos que reciben conlleva una mayor demanda de calor y electricidad, y en el del mercado A, al tratar un volumen tan reducido y poco variado (es solo pescado), no genera suficiente biogás para abastecerse. El mercado T, sin embargo, se parece más a los otros casos porque la electricidad demandada a red por kg de digestato producido es casi despreciable.

Esta energía que demandan los procesos de D.A. es electricidad de alta tensión del mix eléctrico español, por lo que el tipo y cantidad de recursos fósiles agotados depende directamente de la composición de este mix que, para los biofertilizantes, supone (del total de MJ agotados) un 41 % de carbón, 32 % de petróleo y 25 % de gas natural).

### 5.1.3. Potencial de calentamiento global (Global Warming Potential)

La Figura 5.5 muestra los resultados obtenidos para el potencial de calentamiento global que tiene la producción de los biofertilizantes. La cantidad de impacto que se tiene en esta categoría depende, fundamentalmente, de la electricidad empleada en el proceso de D.A. y el diésel consumido por el tractor del proceso de compost, a través de sus emisiones de gases de efecto invernadero. En esta categoría lideran, con diferencia, los mercados E y N, ya que son las mercas que menos autosuficientes son y más electricidad demandan a la red para cubrir sus necesidades energéticas.

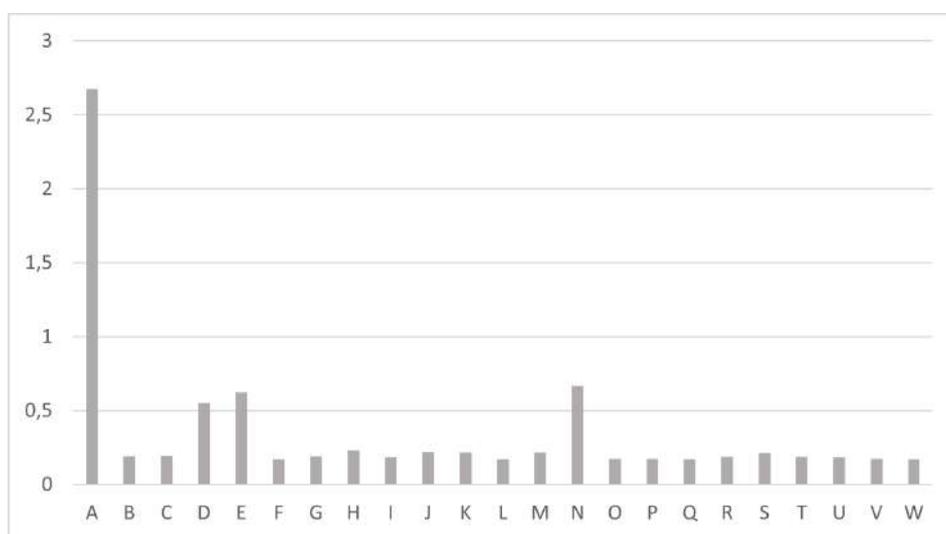


Figura 5.5: Comparación de resultados del potencial de calentamiento global (kg de  $CO_2$  eq.) para todos los mercados

De nuevo, en esta categoría, el mercado A tiene unos valores hasta cinco veces superiores a los demás mercados debido al sobredimensionamiento de la infraestructura (ver Figura 5.5 y Figura C.3), por lo que se ha de realizar un segundo análisis sin infraestructura para poder comparar entre sí todos los casos de manera correcta.

#### 5.1.3.1. Análisis excluyendo la infraestructura

Si se eliminan los impactos de la infraestructura (Figura 5.6) para ver los resultados en función de cantidad y calidad de sustrato, se observa, de nuevo, que los mercados E y N son las ciudades con mayor potencial de calentamiento global ya que, al ser estas las ciudades que tratan una mayor cantidad de residuos, necesitan mucha más energía para funcionar. Para estos mercados, las emisiones derivadas de la electricidad consumida en la D.A., (principalmente,  $CO_2$  y  $CH_4$ ) suponen un 70% de la contribución total al calentamiento global de todo el proceso. El resto de casos presenta prácticamente los

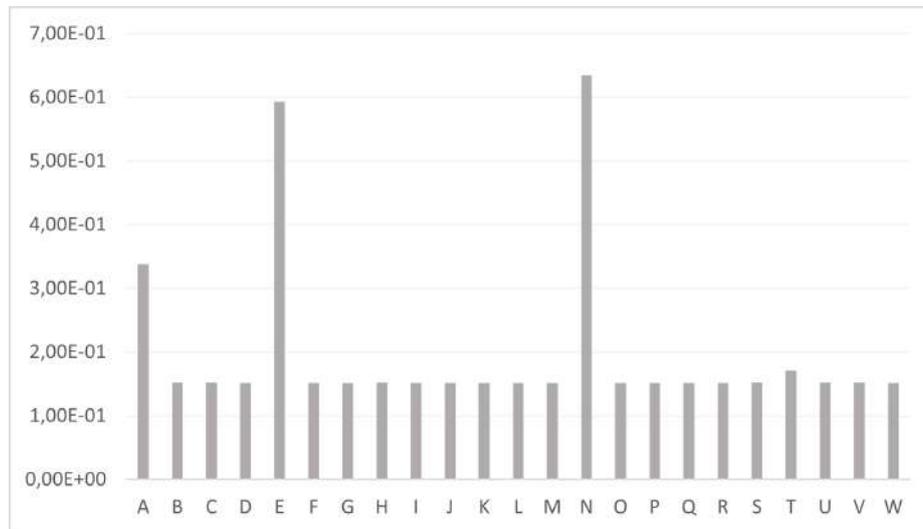


Figura 5.6: Resultados del potencial de calentamiento global (kg de CO<sub>2</sub> eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados

mismos resultados, confirmando que, efectivamente, esta categoría de impacto depende de la energía empleada y no de la calidad del sustrato que reciba el digester anaerobio.

#### 5.1.4. Destrucción de la capa de ozono (Ozone Layer Depletion)

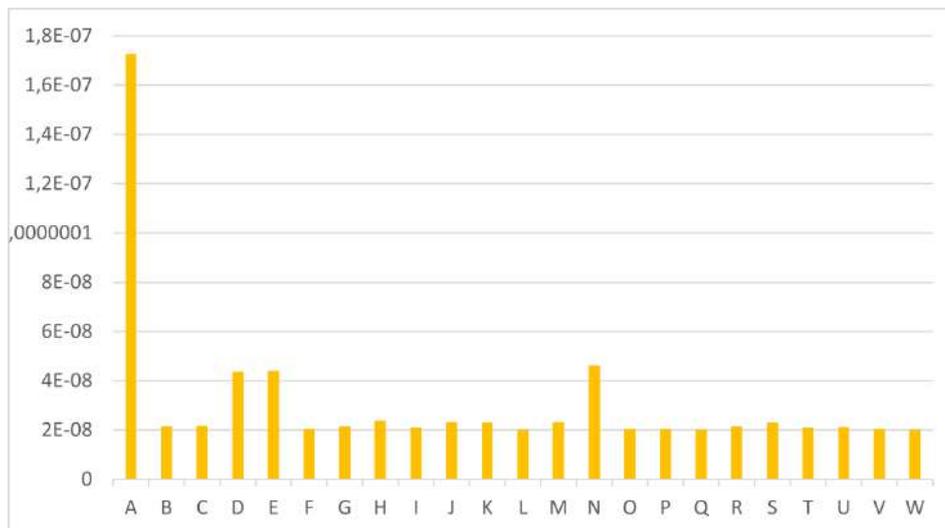


Figura 5.7: Comparación de resultados de capacidad de destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq.) para todos los mercados

Esta categoría de impacto contabiliza todas aquellas emisiones de contaminantes que puedan reaccionar con el ozono atmosférico y destruirlo. Este efecto se mide principalmen-

te mediante la emisión de CFCs (partículas fluorocloradas) cuyo uso directo está regulado por el Protocolo de Montreal, aunque otras emisiones que contengan cloro pueden contribuir a la destrucción del ozono en menor escala.

En el proceso de producción del biofertilizante el principal responsable de la destrucción del ozono es debido a la combustión en los equipos diésel que son utilizados. Este proceso contribuye al 98 % del resultado total en los mercados autosuficientes y 50 % en los que demandan electricidad.

El diésel contiene cloro que, al producir una combustión incompleta en el motor, genera compuestos orgánicos volátiles (COVs) con cloro, que reaccionan con el ozono y lo destruyen. Sin embargo, la cantidad de CFCs equivalentes producidos es casi despreciable para todos los mercados estudiados (incluso teniendo en cuenta el elevado resultado del mercado A debido a la infraestructura).

El 50 % restante de las actividades que contribuyen a la destrucción de la capa de ozono son la extracción y refinado de petróleo necesarias para producir la electricidad consumida durante la digestión anaerobia.

#### 5.1.4.1. Análisis excluyendo la infraestructura

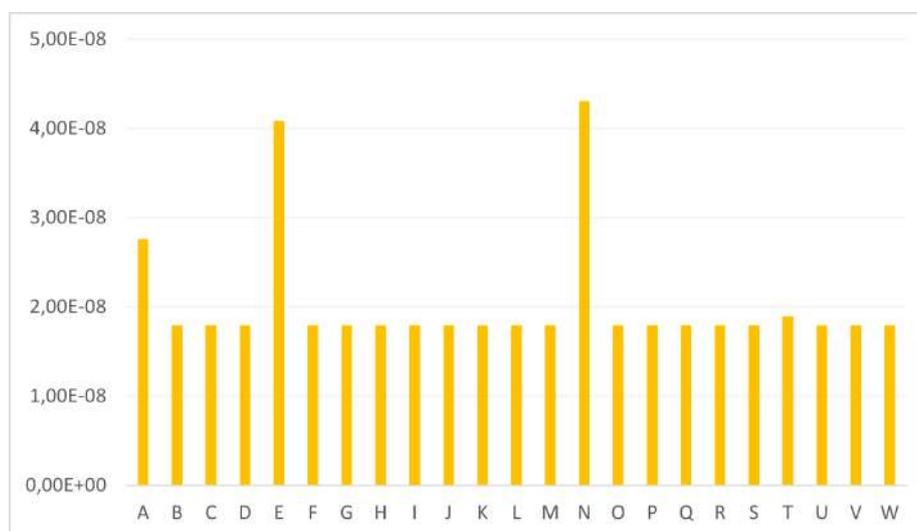


Figura 5.8: Resultados da destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados

Si se eliminan los impactos de la infraestructura, se vuelve a obtener un valor homogéneo para todos los casos, exceptuando los mercados eléctricamente dependientes. Estas ciudades despuntan, de nuevo, debido al gran volumen de digestato producido por ambas marcas, por lo que se necesitan más horas de operación de los equipos diésel en la

D.A. y el compost, lo que conlleva emitir una mayor cantidad de compuestos clorados.

En cuanto a los compuestos que contribuyen a este impacto, se encuentra que los mayores contribuyentes son el Halógeno-1301 (72 %) y CFC-10 (25 %), y ambos derivan del uso de los motores diésel.

### 5.1.5. Toxicidad humana (Human Toxicity)

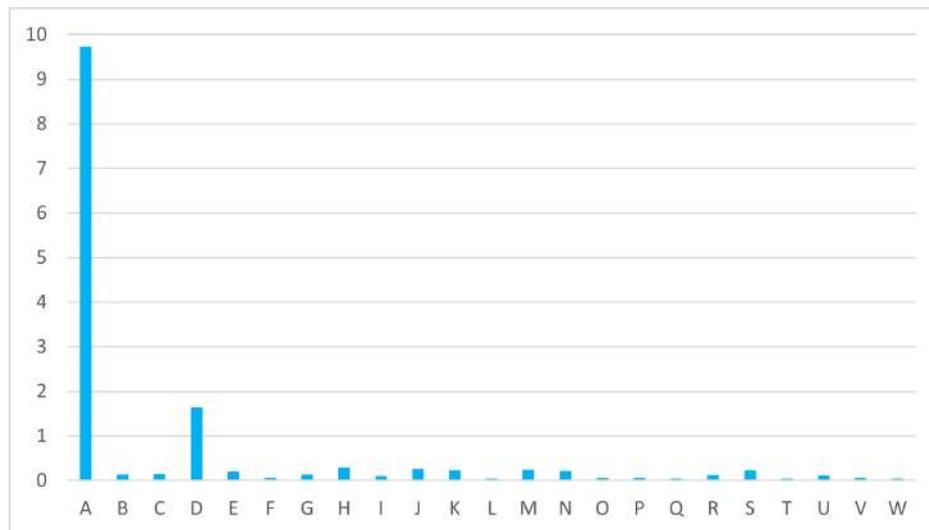


Figura 5.9: Comparación de resultados de toxicidad humana (kg 1,4-DCB eq.) para todos los mercados

En esta categoría de impacto se contabilizan (en kg equivalentes de diclorobenceno) todas aquellas emisiones que causan impactos negativos en la salud al entrar en contacto con el ser humano. La Figura 5.9 muestra los resultados generales obtenidos donde, de nuevo, se observa el desajuste de resultados producido en los mercados A y D debido a la infraestructura, por lo que es más efectivo comparar los resultados excluyendo la infraestructura.

#### 5.1.5.1. Análisis excluyendo la infraestructura

Excluyendo la infraestructura, sucede lo mismo que para la anterior categoría: los casos de mayor impacto son aquellos que no son autosuficientes y requieren electricidad de la red para poder completar el proceso de D.A. (Mercados A, E, N y T) . La mayor contribución se debe al carbón del mix energético de España, cuya fracción de centrales de carbón es responsable de la emisión de metales pesados (plomo, talio, zinc), hidrocarburos (benceno), dioxinas, etc.

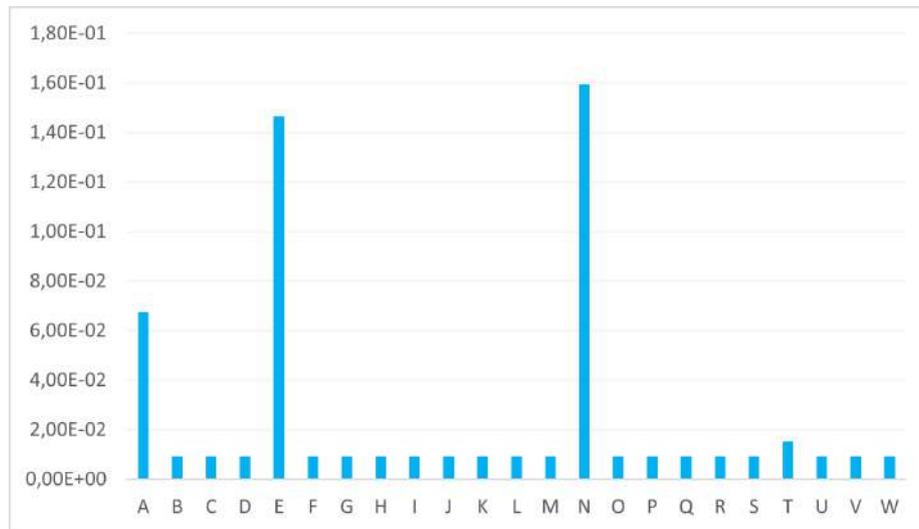


Figura 5.10: Resultados de toxicidad humana (kg 1,4-DCB eq.)excluyendo la infraestructura para todos los mercados

### 5.1.6. Toxicidad del medio acuático (Aquatic Ecotoxicity)

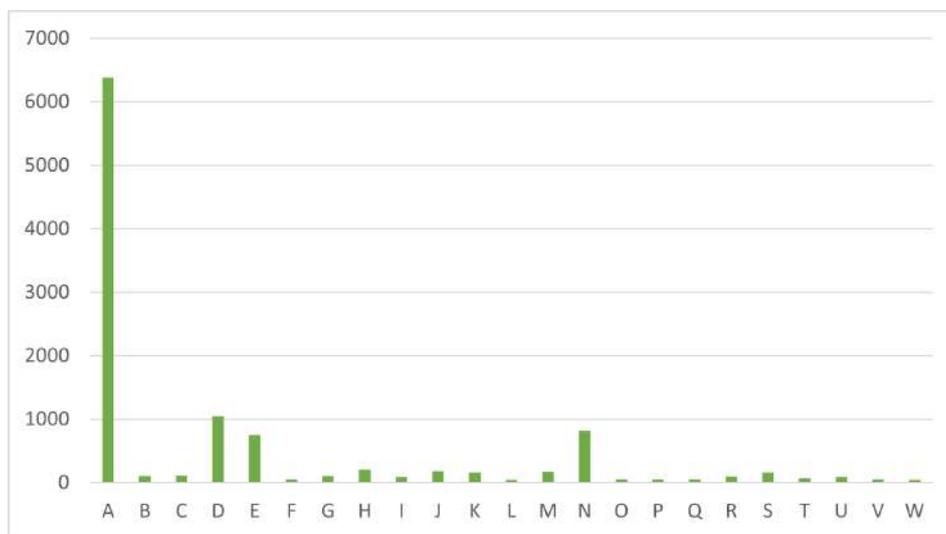


Figura 5.11: Comparación de resultados de toxicidad del medio acuático (kg 1,4-DCB eq.) para todos los mercados

Aunque se mida en la misma sustancia que la toxicidad humana, la toxicidad acuática contabiliza las partículas tóxicas que se emiten o pueden entrar en contacto con ecosistemas acuáticos (ya sean marinos o de agua dulce), por lo que este resultado es diferente al obtenido para la toxicidad humana. La Figura 5.11 vuelve a resaltar los problemas de dimensionamiento de infraestructuras para los mercados más pequeños, por lo que el análisis de resultados se hará excluyendo los impactos de la infraestructura.

### 5.1.6.1. Análisis excluyendo la infraestructura

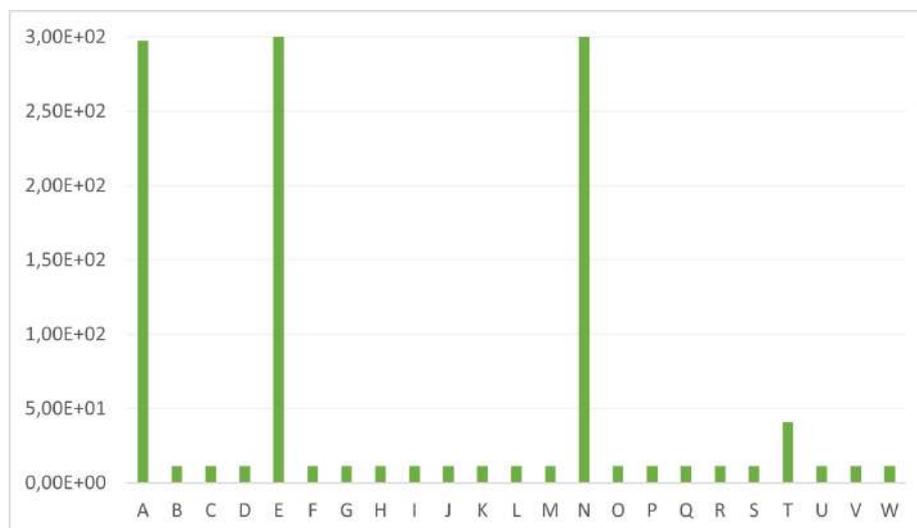


Figura 5.12: Resultados de toxicidad del medio acuático (kg 1,4-DCB eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados

En este caso, mercado A despunta incluso excluyendo la infraestructura del análisis, acompañada de los mercados E y N. En esta categoría de impacto, las mayores contribuciones provienen del uso de la electricidad en la digestión anaerobia, ya que las fracciones de carbón y nuclear del mix eléctrico tienen emisiones que contribuyen a la toxicidad del agua. Estas son, principalmente, la emisión de selenio al agua (22 % de la contribución total), fluoruro de hidrógeno al aire (19 %), cromo (10 %) y níquel (10 %).

### 5.1.7. Toxicidad del medio terrestre (Terrestrial Ecotoxicity)

La toxicidad terrestre se mide, como las otras categorías de toxicidad, en kg equivalentes de diclorobenceno. En este caso, se contabilizan los efectos nocivos que puedan tener las emisiones de los procesos a los seres vivos en ecosistemas terrestres. La Figura 5.13 continúa la línea de los anteriores resultados, confirmando el gran impacto que tiene el sobredimensionamiento de la infraestructura en el mercado A.

#### 5.1.7.1. Análisis excluyendo la infraestructura

Eliminar la infraestructura vuelve a suponer que los mercados con peores resultados sean los que no son autosuficientes. Al no haber una diferencia de impactos entre los residuos utilizados, el punto de comparación entre los 23 casos se reduce a la energía demandada a la red y los impactos derivados de ésta. Concretamente, para estos mercados dependientes de la red, el uso de la electricidad en el procesamiento de los residuos representa el 95 % de su impacto total, mientras que en los mercados autosuficientes, esta

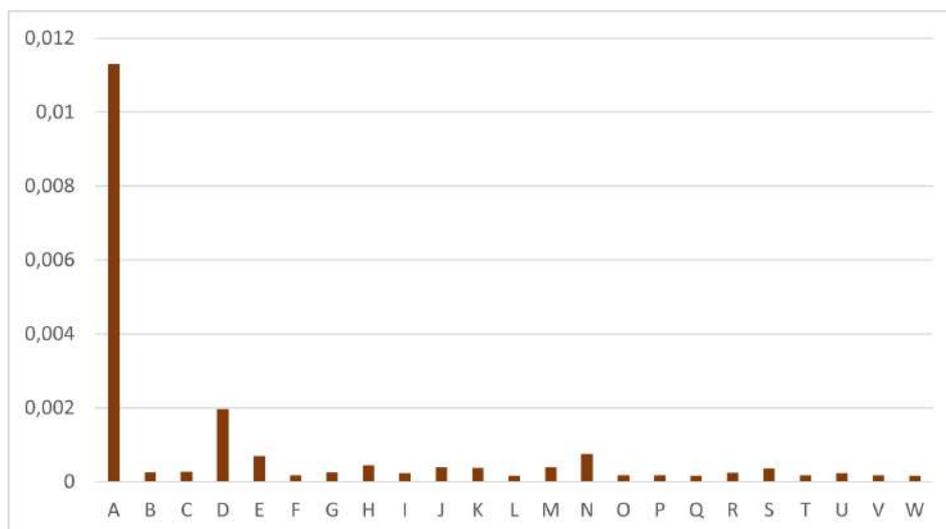


Figura 5.13: Comparación de resultados de toxicidad del medio terrestre (kg 1,4-DCB eq.) para todos los mercados

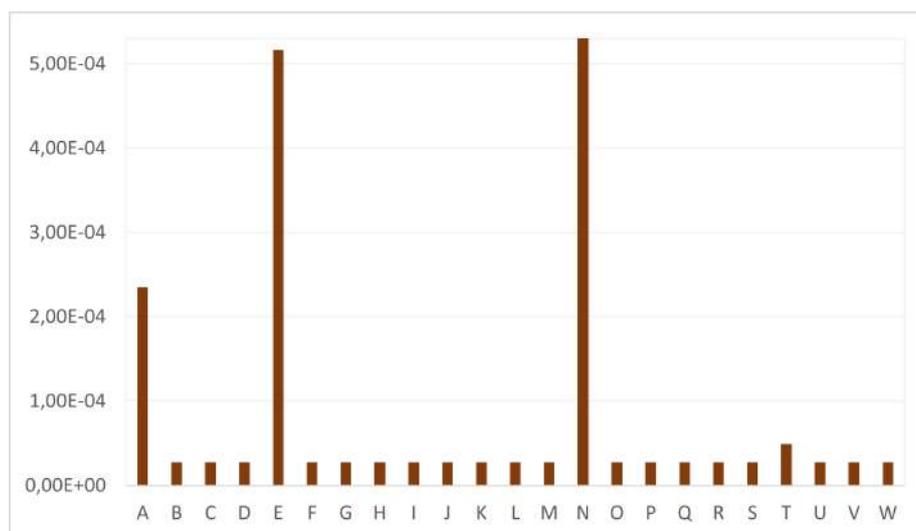


Figura 5.14: Resultados de toxicidad del medio terrestre (kg 1,4-DCB eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados

misma etapa apenas representa menos del 0,5 % del impacto total.

Esta diferencia entre mercados autosuficientes y dependientes se evidencia nuevamente al analizar los contaminantes que contribuyen en mayor medida a la toxicidad terrestre en ambos casos: en los mercados autosuficientes, el mayor contribuyente a la toxicidad terrestre son la extracción de telurio y oro (31 % y 13 %, respectivamente) para los catalizadores de los motores diésel; mientras que, para los mercados dependientes, el mayor impacto se debe a las emisiones de mercurio al aire y agua derivadas del uso de la red

energética (76 %), haciendo que los impactos derivados de la operación de maquinaria diésel sean despreciables en términos porcentuales.

### 5.1.8. Oxidación fotoquímica (Photochemical Oxidation)

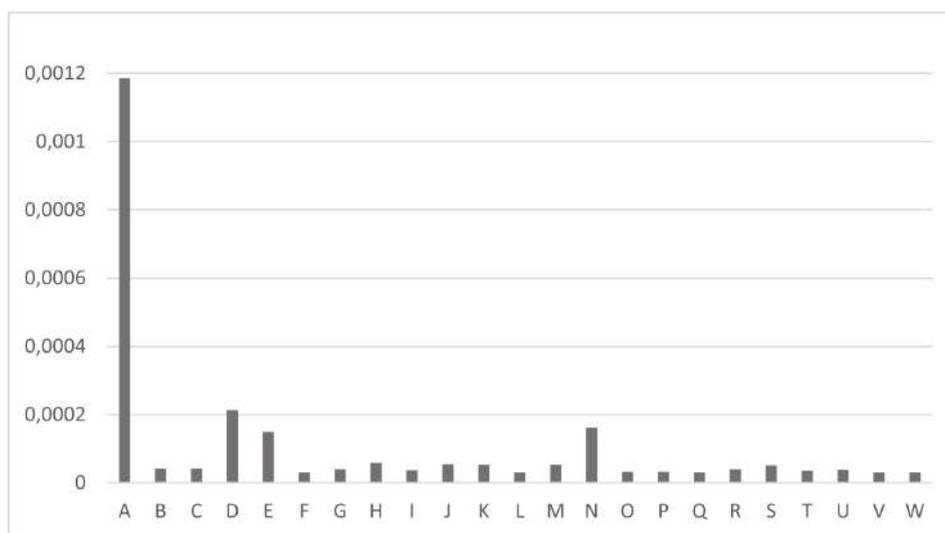


Figura 5.15: Comparación de resultados de oxidación fotoquímica (kg de  $C_2H_4$  eq.) para todos los mercados

Esta categoría mide el potencial de contribución al desencadenamiento de reacciones fotoquímicas en la atmósfera, a través de la contabilización de emisiones de  $C_2H_4$  equivalente. Una reacción fotoquímica se produce cuando interactúan los óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y oxígeno de la atmósfera con la radiación solar para dar lugar a compuestos oxidantes. Estos compuestos son considerados contaminantes 'secundarios' ya que no son emitidos por una fuente contaminante, sino producidos como consecuencia de la interacción de otro contaminante con el medio.

La Figura 5.15 muestra los resultados para esta categoría de impacto, donde se puede ver que el mercado A vuelve a despuntar debido a su sobredimensionamiento de infraestructura y seguida, a menor escala, por el resto de mercados que no son autosuficientes en el proceso de digestión anaerobia (mercados E y N).

#### 5.1.8.1. Análisis excluyendo la infraestructura

Si se elimina la contribución de la infraestructura (Figura 5.16), los mercados con mayor impacto son los mercados E y N (los que demandan grandes cantidades de electricidad de la red), seguidos del mercado A, cuyo impacto total disminuye un 94 % al eliminar la infraestructura del análisis. En una segunda línea se encuentran todos los demás mercados, independientemente del tipo de residuo que se procese en cada uno. Nuevamente, esta

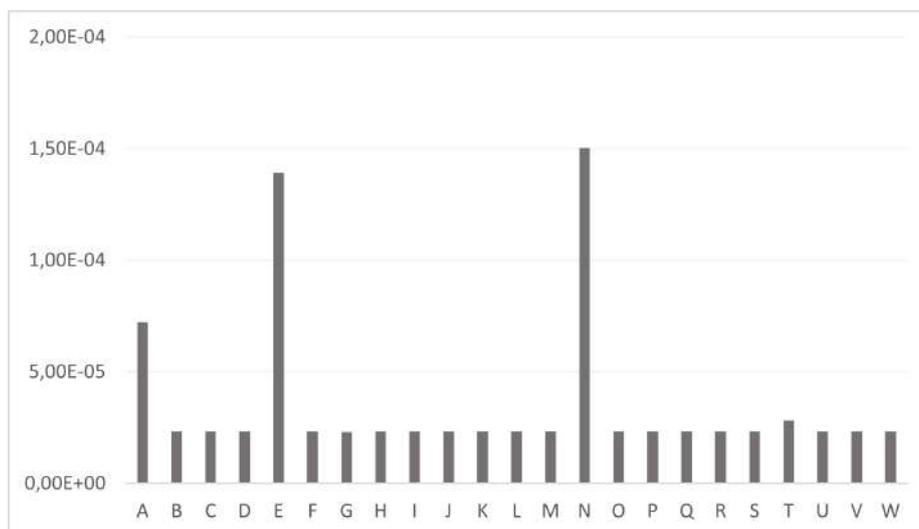


Figura 5.16: Resultados de oxidación fotoquímica (kg de  $C_2H_4$  eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados

diferencia de resultados se debe al impacto de la electricidad que utilizan los mercados no autosuficientes en la fase de digestión anaerobia. Para estos casos, esta fase representa un 84 % del impacto total obtenido, mientras que para los mercados autosuficientes representa solo un 5 % de impacto.

Centrándose más en los compuestos que contribuyen a este impacto, encontramos, independientemente de si el mercado es autosuficiente o no, un fuerte componente de  $CH_4$  biogénico (debido a su origen y formación a partir de materia orgánica biológica) emitido al aire durante el proceso de compost (supone 33 % del total para los mercados autosuficientes y 5 % para los demás), y la emisión de  $SO_2$  y  $CO_2$  derivados del uso de la maquinaria diésel y la electricidad (41 % para los autosuficientes y 81 % para los demás).

### 5.1.9. Acidificación (Acidification)

La categoría de acidificación hace referencia a la disminución del pH tanto de suelos como aguas debido a la transformación de contaminantes en ácidos, y se mide a través de las emisiones de  $SO_2$  equivalente. En la primera aproximación con la infraestructura, se aprecia que el impacto de esta es mucho menor que en las otras categorías que se han analizado ya que, el mercado A, con su sobredimensionamiento de infraestructura, solo dobla los resultados de los demás mercados (ver Figura C.9), cuando en otras categorías llegaba a presentar un resultado 14 veces mayor que los demás. Este cambio en las gráficas de infraestructura confirma que casi la totalidad de emisiones que contribuyen a la acidificación provienen de los procesos, y no de la construcción de las infraestructuras.

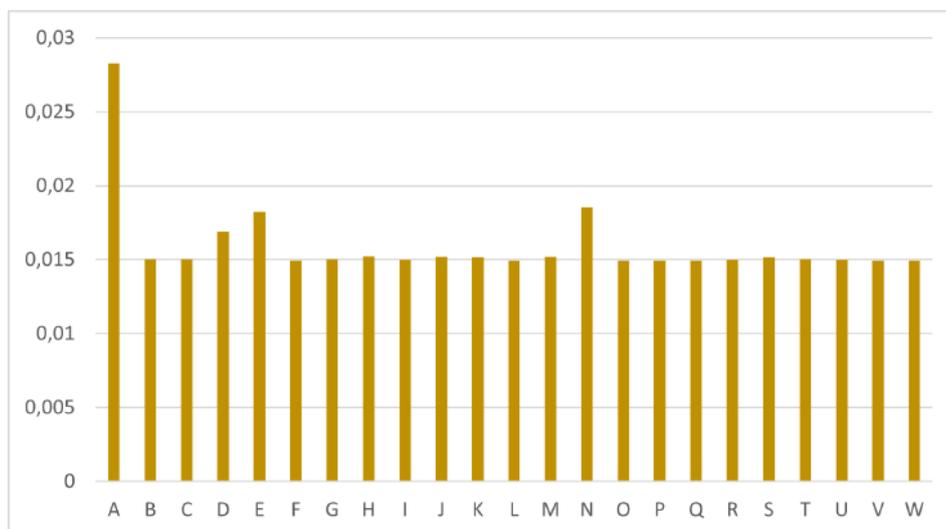


Figura 5.17: Comparación de resultados de acidificación (kg SO<sub>2</sub> eq.) para todos los mercados

### 5.1.9.1. Análisis excluyendo la infraestructura



Figura 5.18: Resultados de acidificación (kg SO<sub>2</sub> eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados

Si se excluye la infraestructura del análisis, se nivelan todos los mercados a excepción del mercado A, E y N, que despiertan ligeramente debido a su mayor demanda energética (aumentando así un 20 % su resultado final en esta categoría de impacto). Esto es debido a la fracción fósil del mix eléctrico español, y los contaminantes atmosféricos producidos por su fracción de electricidad no renovable.

En todos los casos, el contaminante que más contribuye a la acidificación es el amoníaco emitido al aire durante el compostaje del digestato (98 % en los mercados autosuficientes y 81 % en los dependientes), seguido del  $SO_2$  y los  $NO_x$  derivados del uso de electricidad y de la combustión en el motor diésel (que contribuyen el 2 % y 19 % restante en cada caso).

### 5.1.10. Eutrofización (Eutrophication)

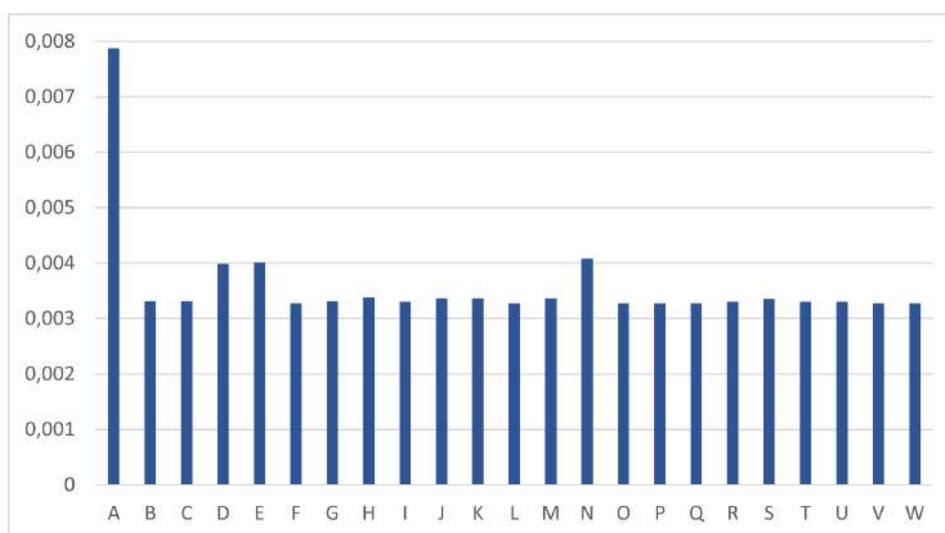


Figura 5.19: Comparación de resultados de eutrofización (kg  $PO_4$  eq.) para todos los mercados

La eutrofización es el proceso en el cual un cuerpo de agua se sobre enriquece de nutrientes y minerales, generalmente nitrógeno y fósforo. Este enriquecimiento provoca un crecimiento descontrolado de algas que enturbia el agua y evita que traspase la luz solar, lo cual mata a la vegetación del fondo (al no poder realizar la fotosíntesis), agotándose así el oxígeno del agua que necesitan los peces y moluscos.

En el análisis con infraestructura de eutrofización ocurre lo mismo que con el acidificación: se puede apreciar el sobredimensionamiento de la infraestructura en los mercados A y D, pero no llega a marcar una diferencia tan grande como la que se veía en las demás categorías con respecto a los demás mercados. Esto sugiere que la contribución de la infraestructura en la eutrofización es reducida (alrededor de un 2 % de media, ver Figura [C.10](#)).

#### 5.1.10.1. Análisis Excluyendo la Infraestructura

Si se realiza un segundo análisis excluyendo la infraestructura (Figura [5.20](#)), se vuelven a nivelar todos los resultados a falta de los casos puntuales de los mercados no autosuficientes en la etapa de digestión anaerobia, por la contribución a la eutrofización de la

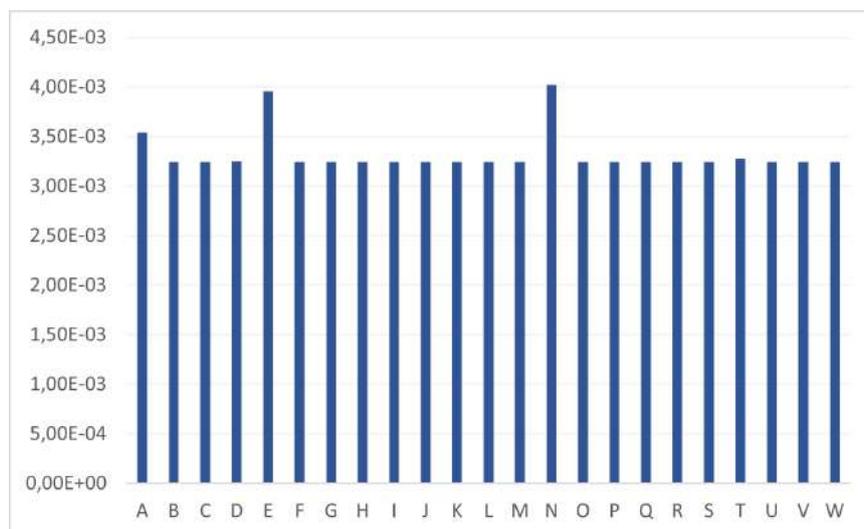


Figura 5.20: Resultados de eutrofización (kg  $PO_4$  eq.) excluyendo la infraestructura para todos los mercados

electricidad que utilizan (la cual aumenta en un 18 % su resultado final en esta categoría de impacto). Debido a ésto, se obtienen dos tipos de resultados según si el mercado es energéticamente autosuficiente en la digestión o no.

En todos los casos, el contaminante que más contribuye a la acidificación es el amoníaco emitido al aire durante el compostaje del digestato (98 % en los mercados autosuficientes y 80 % en los dependientes), seguido del  $SO_2$  y los  $NO_x$  derivados del uso de electricidad y de la combustión en el motor diésel (que contribuyen el 2 % y 20 % restante en cada caso). El amoníaco es el mayor contribuyente a este impacto ya que su contenido en nitrógeno sirve de nutriente para las algas de las masas de agua.

## 5.2. Análisis de ciclo de vida de los fertilizantes comerciales

Hasta este punto se han evaluado los resultados del ACV de los biofertilizantes producidos por cada uno de los mercados pero, a falta de una referencia de la industria actual, sólo se han podido comparar los resultados entre los distintos mercados. En esta sección de los resultados se realizará una evaluación ambiental del biofertilizante en comparación con los fertilizantes que se usan actualmente en los cultivos.

Para poder comparar de manera objetiva el biofertilizante con los fertilizantes comerciales que se usan generalmente en la agricultura, es necesario que estos tengan la misma composición (ya que una diferencia en la composición puede resultar en una diferencia sustancial en los resultados del ACV). Por este motivo, se comparará cada biofertilizante

con un fertilizante tipo NPK (que contiene nitrógeno, fósforo y potasio) de igual composición. La Tabla 5.1 muestra el porcentaje de nitrógeno, fósforo y potasio que contiene cada biofertilizante, y asigna un tipo de fertilizante NPK (con los porcentajes respectivos de cada elemento en la composición del fertilizante) con el que va a ser comparado. En total, se han analizado 5 tipos de fertilizante:

Tabla 5.1: Asignación de fertilizante para comparar los resultados obtenidos

	% Nitrógeno	% Fósforo	% Potasio	Fertilizante Tipo
A	15%	1%	3%	15-1-3
B	2%	0%	3%	2-0-3
C	2%	0%	3%	2-0-3
D	7%	0%	3%	7-0-3
E	6%	0%	3%	6-0-3
F	7%	0%	3%	7-0-3
G	9%	0%	3%	9-0-3
H	2%	0%	3%	2-0-3
I	7%	0%	3%	7-0-3
J	6%	0%	3%	6-0-3
K	7%	0%	3%	7-0-3
L	6%	0%	3%	6-0-3
M	6%	0%	3%	6-0-3
N	7%	0%	3%	7-0-3
O	7%	0%	3%	7-0-3
P	6%	0%	3%	6-0-3
Q	2%	0%	3%	2-0-3
R	6%	0%	3%	6-0-3
S	2%	0%	3%	2-0-3
T	6%	0%	3%	6-0-3
U	2%	0%	3%	2-0-3
V	2%	0%	3%	2-0-3
W	6%	0%	3%	6-0-3

- 15-1-3
- 2-0-3
- 6-0-3

- 7-0-3
- 9-0-3

Los resultados por categoría de impacto del análisis CML de los cinco tipos de fertilizante se detallan en el Anexo [D](#).

Es importante destacar que estos fertilizantes inorgánicos tienen composiciones hechas a medida para poder compararlos correctamente con el biofertilizante de los mercados, pero ninguno de los cinco presenta una composición de fertilizante inorgánico habitual en la agricultura. En un futuro, si que quisiese obtener una composición de biofertilizante que sustituya a los fertilizantes comunes, habrá que variar los porcentajes de cada sustrato a la entrada del proceso de D.A..

### 5.2.1. Comparación de impactos entre el fertilizante inorgánico y el biofertilizante

A continuación, se analizarán 4 de los mercados del estudio como casos representativos. Para cada uno de ellos, se analizará el impacto del fertilizante inorgánico sobre el del biofertilizante de manera que, si se obtiene una puntuación superior al 100%, el biofertilizante tiene un menor impacto que el fertilizante comercial (inorgánico). El análisis del resto de mercados se encuentra en el Anexo [E](#), y una comparativa por categoría de impacto se incluye en el Anexo [D](#).

#### 5.2.1.1. Mercado A

Este caso representa el fenómeno de sobredimensionamiento de infraestructura que se ha observado en el análisis por categorías de impacto, además de ser uno de los mercados no autosuficientes en el proceso de digestión anaerobia. En la Figura [5.21](#) se puede ver que el biofertilizante supera al fertilizante comercial en todos las categorías de impacto del método CML, concluyendo que el biofertilizante es, en este caso, menos sostenible que un fertilizante inorgánico común.

Este resultado negativo se obtiene principalmente por un motivo: el sobredimensionamiento de la planta de digestión anaerobia. Como se ha querido generalizar el estudio para los 23 casos, se ha establecido un digestor tipo de tamaño medio para todos en lugar de ajustar las dimensiones del digestor al volumen de residuos generados por cada mercado. En el caso del mercado A, al ser el mercado con menor cantidad de residuos, el digestor se queda muy sobredimensionado con respecto a las necesidades reales, lo que resulta en un impacto relativo de infraestructura muy grande, además de que el biogás generado no es suficiente para calentar el digestor, por lo que se demanda energía de la red eléctrica. Este sobredimensionamiento aumenta considerablemente los resultados en todas las categorías

de impacto, haciendo que el biofertilizante presente unos resultados de ACV peores que los del fertilizante común.

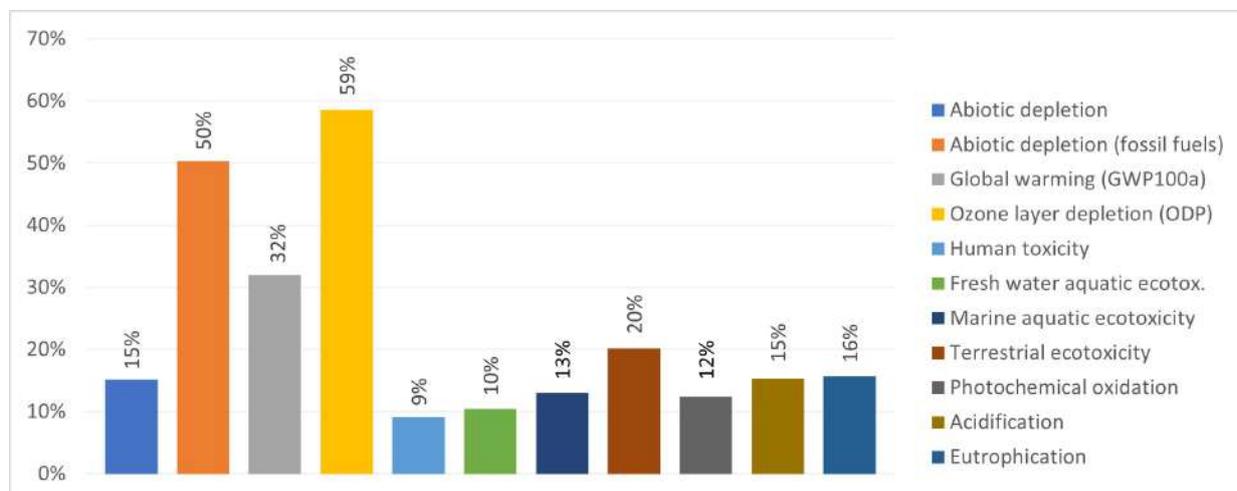


Figura 5.21: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado A

### 5.2.1.2. Mercado D

El mercado D vuelve a tener una infraestructura mucho mas grande de lo necesario aunque, en este caso, el volumen de residuos que trata es suficiente para poder generar el calor requerido por el digestor, por lo que no requiere energía de la red eléctrica.

Al ser autosuficiente, se mejoran considerablemente los resultados obtenidos, llegando un biofertilizante competitivo en las categorías de agotamiento de combustibles fósiles y destrucción de la capa de ozono.

### 5.2.1.3. Caso G: Córdoba.

Este caso es el caso tipo, ya que representa a los 19 mercados restantes al no presentar problemas de sobredimensionamiento ni autosuficiencia, además de utilizar residuo variado en el origen del proceso productivo.

Este es el mejor caso posible, ya que reproduce las condiciones reales de un biofertilizante de digestato que proviene de una planta de D.A. correctamente dimensionada para el volumen entrante de residuos, por lo que permite realizar una comparación en igualdad de condiciones con el fertilizante inorgánico. La Figura 5.23 muestra como el biofertilizante mejora los resultados del fertilizante orgánico en 9 de las 11 categorías de impacto analizadas y, en muchas de ellas, siendo hasta varias veces mas sostenible (superando el 100 % de reducción del impacto).

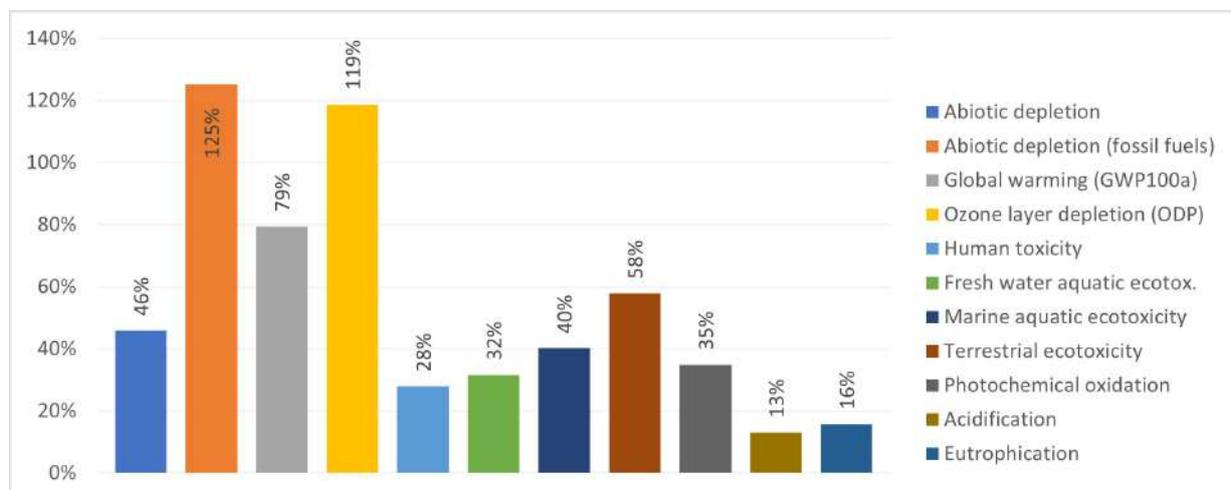


Figura 5.22: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado D

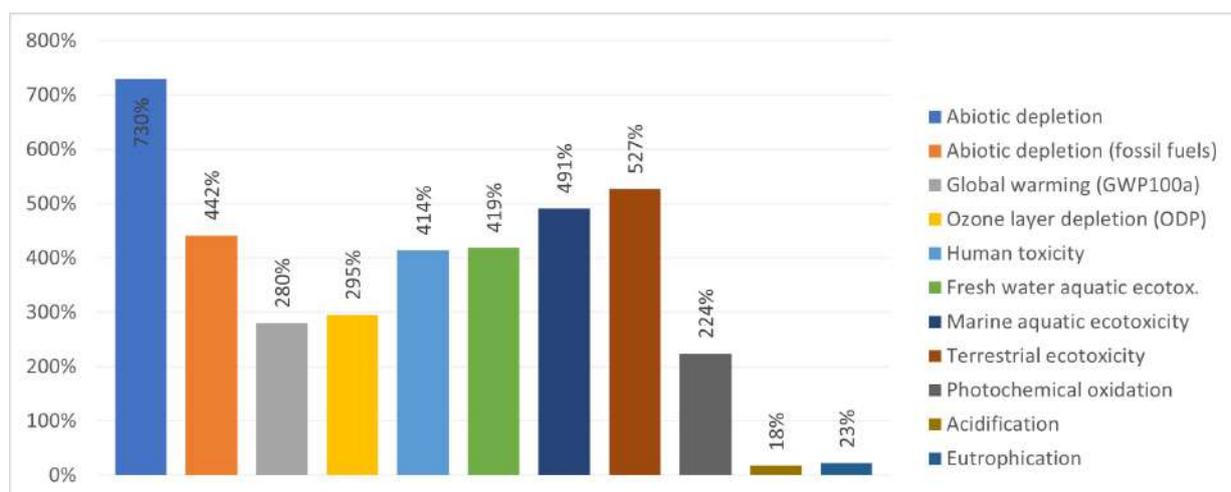


Figura 5.23: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado G

#### 5.2.1.4. Mercado N

El mercado N, como el E, presenta el caso opuesto al mercado A: un infradimensionamiento de la infraestructura. Este mercado genera demasiados residuos para el tamaño de digester establecido, por lo que no se genera suficiente biogás para la gran demanda de energía que tiene el digester. A priori, este infradimensionamiento debería de mejorar los resultados con respecto al caso típico (se puede ver en el gran resultado en el agotamiento de recursos naturales), ya que el impacto de la infraestructura por kg de biofertilizante se ve reducido de manera considerable, pero la energía requerida de la red añade los impactos del mix energético nacional, aumentando los resultados para todas las categorías. Es por

este motivo que la Figura 5.24 tiene un resultado medio: mejor que el del mercado A, pero no llegando a las 9 categorías mejoradas del caso típico.

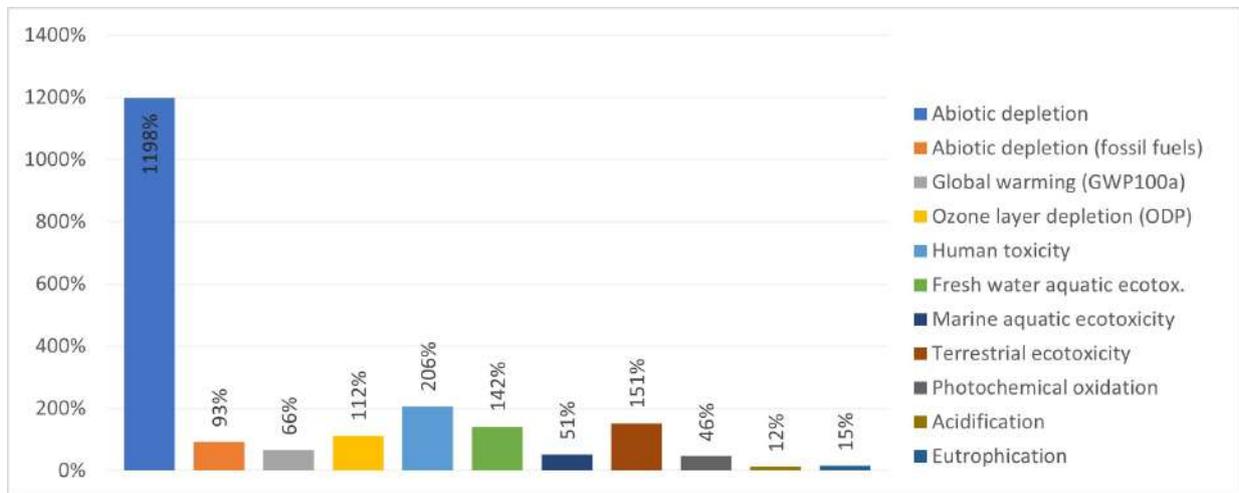


Figura 5.24: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado N

# Capítulo 6

## Conclusiones

A lo largo de la memoria, se ha detallado la construcción del modelo de producción de biofertilizante, así como su evaluación ambiental frente a la alternativa actual: los fertilizantes inorgánicos. Para ello, se han escogido fertilizantes inorgánicos de igual composición a la del biofertilizante obtenido para cada uno de los 23 mercados estudiados a través de un proceso de digestión anaerobia y compost estandarizado.

Como se ha mostrado en el Capítulo 5, los resultados de esta comparación varían sustancialmente dependiendo del volumen y composición de residuos de cada caso, así como la categoría ambiental en la que se establece dicha comparación. Con el fin de poder comparar de manera definitiva los resultados obtenidos para fertilizante y biofertilizante y así, determinar cuál de ellos es mejor medioambientalmente hablando, se han convertido a valores unitarios las puntuaciones de cada una de las categorías, obteniendo así una puntuación total agregada para cada producto. A continuación, la Figura 6.1 muestra para cada mercado el tanto por ciento de ahorro de impactos ambientales del biofertilizante con respecto al fertilizante.

Como se ve en la Figura 6.1, 17 de los 23 casos estudiados suponen una reducción de los impactos totales al medioambiente sobre su fertilizante de comparación. Destacan negativamente los siguientes casos:

- **Mercado A**, debido al sobredimensionamiento de los equipos, que hace que el impacto de infraestructura se dispare y que el proceso demande energía de la red.
- **Mercado D**, debido al sobredimensionamiento de las estructuras, aunque mejor que el mercado A ya que el proceso sí es autosuficiente.
- **Mercados E y N**, debido al infradimensionamiento de la infraestructura con respecto al volumen de residuos tratado, haciendo que el proceso sea dependiente de la red eléctrica.
- **Mercados H y S** cuya mezcla de residuos sólo contiene verdura, y debido a un ligero sobredimensionamiento.

En los 17 casos restantes, se obtiene una media de reducción de impactos de 55% de los impactos del fertilizante convencional, demostrando así que el biofertilizante es una alternativa más sostenible de aporte de nutrientes a los suelos en la agricultura, además de resultar un método eficaz de valorización de un subproducto (el digestato), de un proceso de DA que ya de por sí valoriza un residuo procedente de distintos mercados de abastos.

## 6.1. Futuras mejoras del modelo

El modelo de proceso productivo de biofertilizante utilizado en este estudio no deja de ser una primera aproximación a la evaluación de los biofertilizantes como sustituto de fertilizantes inorgánicos en un contexto similar. A lo largo de la simulación y análisis de resultados, se han encontrado una serie de limitaciones del modelo que, si bien permiten la escalabilidad de éste, afectan a la precisión de los resultados que proporciona. A continuación, se listan las mejoras a incorporar en una segunda iteración del modelo de proceso:

### 6.1.1. Dimensionamiento de la infraestructura de acuerdo con el volumen de residuos tratados

A lo largo del Capítulo 5 se ha observado el impacto del uso de una infraestructura estándar para todos los mercados en los resultados del análisis de ciclo de vida: un sobre-dimensionamiento de infraestructura conlleva un impacto de los edificios mayor por kg de fertilizante, y un infra-dimensionamiento un impacto menor. El Anexo [C](#) muestra que la sensibilidad de los resultados al tamaño de la infraestructura estándar es considerable, y en los casos en los que ésta no se ajusta al volumen de residuos tratados siempre se obtiene un biofertilizante más contaminante que el fertilizante convencional.

En un futuro, para eliminar el factor de dimensionamiento de la infraestructura como distorsionador de resultados, se tendría que adaptar el modelo para que cada mercado tenga una infraestructura ajustada a sus volúmenes de producción y que así la sensibilidad de los resultados a la infraestructura sea la misma para todos los mercados.

### 6.1.2. Influencia del tipo de sustrato y el impacto de la co-digestión en el ahorro de impactos

En el modelo utilizado en este estudio, el la mezcla de sustratos a digerir sólo tiene impacto en la producción de biogás y en la composición del biofertilizante. Sin embargo, la mezcla de sustratos en el digestor o co-digestión puede ser un factor clave en la optimización de producción de biogás, reduciendo así el porcentaje de impactos atribuidos al digestato y, por lo tanto, reduciendo el impacto final del biofertilizante. Sería de gran interés optimizar la mezcla de residuos disponible en cada mercado para optimizar el biogás generado, e intentar lograr que todas las plantas de digestión anaerobia sean autosuficientes.

### 6.1.3. Mejora en la definición de las emisiones de los procesos productivos

En el modelo actual, se ha utilizado un modelo de compost para el inventario de ciclo de vida estándar provisto por la base de datos Ecoinvent, que fija una cantidad de emisiones de  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$  y  $CH_4$  por kg de digestato sometido al proceso de compost. Esta primera aproximación cumple el objetivo de caracterizar las emisiones e impactos derivadas de éste, pero no tiene en cuenta la composición del digestato que se somete al proceso de compost, que es un factor clave en la cantidad de emisiones atmosféricas. Para hacer el modelo más completo, sería necesario investigar las emisiones concretas en función de la composición y tiempo de compostaje del sustrato.

También es importante destacar que, aunque en la D.A. sí se tiene en cuenta un sistema de control de emisiones y solo se contabilizan las fugas, en el compost todas las emisiones se van a la atmósfera. Sería de interés investigar si existen plantas de compost con sistemas de control de emisiones, ya que una reducción de estas tendría un impacto muy positivo en los resultados en las categorías de eutrofización y acidificación (que, actualmente, son peores resultados que los del fertilizante en los 23 casos estudiados).

### 6.1.4. Ampliación de los límites del sistema para incluir la aplicación del biofertilizante al terreno

En el modelo actual, se realiza un análisis de ciclo de vida 'from cradle to gate' (de la cuna a la puerta de la fábrica), lo que significa que se han analizado y contabilizado todos los impactos de extracción de materias primas, procesamiento de materiales y manufactura de los productos, pero no se han tenido en cuenta los impactos de uso y disposición final de éstos. Para poder evaluar de una forma más completa tanto el fertilizante inorgánico como el biofertilizante, sería necesario estudiar el impacto que estos tienen en los suelos una vez son aplicados en función de su composición, su descomposición y final de vida, "from cradle to cradle".

Figura 6.1: Comparación unitaria entre fertilizante y biofertilizante



# Bibliografía

- [1] O. W. in Data, “Fertiliser use per ha of cropland, 2020.”
- [2] C. M. Polo, “Solid waste management course notes on anerobic digestion,” Enero 2023.
- [3] S. Mercados Centrales de Abastecimiento, “Mercasa informe anual 2021.” <https://www.mercasa.es/publicaciones/informes-anales/>.
- [4] C. Morales-Polo, M. d. M. Cledara-Castro, K. Hueso-Kortekaas, and M. Revuelta-Aramburu, “Anaerobic digestion in wastewater reactors of separated organic fractions from wholesale markets waste. compositional and batch characterization. energy and environmental feasibility,” *Science of the Total Environment*, vol. 726, 2020.
- [5] C. Morales Polo, *Co-digestión anaerobia y pretratamientos de residuos agroalimentarios con fangos UASB de depuradora. Caracterización BMP y análisis*. PhD thesis, Universidad Pontificia Comillas, ICAI, 2019.
- [6] W. B. Association, *The contribution of Anaerobic Digestion and Biogas towards achieving the UN Sustainable Development Goals*. WBA, 2016.
- [7] D. Library, “Lca history.”
- [8] C. M. Sastre, “Life cycle assessment and footprints course notes,” Septiembre 2022.
- [9] F. Ardolino and et al., “Biowaste-to-biomethane or biowaste-to-energy? an lca study on anaerobic digestion of organic waste,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 174, pp. 462–476, 2018.
- [10] J. BAcenetti, C. Sala, A. Fusi, and M. Fiala, “Agricultural anaerobic digestion plants: What lca studies pointed out and what can be done to make them more environmentally sustainable,” *Applied Energy*, vol. 179, pp. 669–686, 2016.
- [11] E. M. Foundation, “What is a circular economy?.”
- [12] P. S. University, “A short history of anaerobic digestion.”
- [13] T. Karetta and et al., “Lca of anaerobic digestion: Emission allocation for energy and digestate,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 235, pp. 1567–1579, 2019.
- [14] C. Morales-Polo, M. d. M. Cledara-Castro, and Y. Soria-Moratilla, “Reviewing the anaerobic digestion of food waste: From waste generation and anaerobic process to its perspectives,” *Applied Sciences*, vol. 8, 2018.

- [15] I. para la Diversificación y Ahorro de Energía, “El biogás en España.”
- [16] N. Nwokolo, P. Mukumba, K. Oibileke, and M. Enebe, “Waste to energy: A focus on the impact of substrate type in biogas production,” *MDPI processes*, vol. 8, p. 1224, 2020.
- [17] C. Morales-Polo, M. d. M. Cledera-Castro, and M. Revuelta-Aramburu, “Anaerobic digestion of organic fraction combinations from food waste, for an optimal dynamic release of biogas, using H<sub>2</sub> as an indicator,” *Science of the Total Environment*, vol. 857, 2022.
- [18] T. Rehl and J. Müller, “Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 56, 2011.
- [19] E. Angouria-Tsorochidou, “Life cycle assessment of digestate post-treatment and utilization,” *Science of the Total Environment*, vol. 815, pp. 192–104, 2022.
- [20] R. Mikkelsen and T. Bruulsema, “Fertilizer use for horticultural crops in the U.S. during the 20th century,” *American Society of Horticultural Science*, vol. 15, 2005.
- [21] N. Otero, L. Vitòria, A. Solaer, and A. Canals, “Fertiliser characterisation: Major, trace and rare earth elements,” *Applied Geochemistry*, vol. 20, pp. 1473–1488, 2005.
- [22] B. Sturmer and et al., “Legal requirements for digestate as fertilizer in Austria and the European Union compared to actual technical parameters,” *Journal of Environmental Management*, vol. 253, 2020.
- [23] M. Manu, “A review on nitrogen dynamics and mitigation strategies of food waste composting,” *Bioresource Technology*, vol. 334, 2021.
- [24] M. De Sanctis, S. Chimienti, C. Pastore, V. Piergrossi, and C. Di Iaconi, “Energy efficiency improvement of thermal hydrolysis and anaerobic digestion of Posidonia oceanica residues,” *Applied Energy*, vol. 252, 2019.
- [25] J. Lu and et al., “Improving anaerobic sewage sludge digestion by implementation of a hyper-thermophilic prehydrolysis step,” *Journal of Environmental Management*, vol. 88, 2008.
- [26] C. Morales-Polo, M. d. M. Cledera-Castro, and Y. Soria-Moratilla, “Biogas production from vegetable and fruit markets waste—compositional and batch characterizations,” *Sustainability*, vol. 11, 2019.
- [27] M. Pognani, G. D’Imporzano, and C. Minetti, “Optimization of solid state anaerobic digestion of the OFMSW by digestate recirculation: A new approach,” *Waste Management*, vol. 35, pp. 111–118, 2015.
- [28] H. Baldé, C. Wagner-Riddle, D. MacDonald, and A. VanderZaag, “Fugitive methane emissions from two agricultural biogas plants,” *Waste Management*, vol. 151, 2022.

- [29] A. Groth, C. Maurer, M. Reiser, and M. Kranert, “Determination of methane emission rates on a biogas plant using data from laser absorption spectrometry,” *Biore-source Technology*, vol. 178, 2015.
- [30] M. Hrad, M. Piringer, and M. Huber-Humer, “Determining methane emissions from biogas plants – operational and meteorological aspects,” *Biore-source Technology*, vol. 191, 2015.
- [31] F. T.K., R. Desjardins, and D. Worth, “Fugitive methane emissions from an agricultural biodigester,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, 2011.
- [32] T. Reinelt, B. McCabe, A. Hill, P. Harris, C. Baillie, and J. Liebetrau, “Field measurements of fugitive methane emissions from three australian waste management and biogas facilities,” *Waste Management*, vol. 137, 2022.
- [33] S. Bakkaloglu, D. Lowry, R. Fisher, and J. France, “Quantification of methane emissions from uk biogas plants,” *Waste Management*, vol. 124, 2021.
- [34] C. M. Polo, “Solid waste management course notes on cospost,” Enero 2023.
- [35] C. Resch, R. Braun, and R. Kirchmayr, “The influence of energy crop substrates on the mass-flow analysis and the residual methane potential at a rural anaerobic digestion plant,” *Water Science Technology*, vol. 57, pp. 73–80, 2008.
- [36] Z. e. a. Zehui, “Achieve clean and efficient biomethane production by matching between digestate recirculation and straw-to-manure feeding ratios,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, 2020.
- [37] I. energy Agency, “Sustainable supply potential and costs.”
- [38] J. Dahlin, C. Herbes, and M. Nelles, “Biogas digestate marketing: Qualitative insights into the supply side,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 104, pp. 152–161, 2015.
- [39] L. Jurgutis, A. Slepetiene, J. Slepetys, and J. Ceseviciene, “Towards a full circular economy in biogas plants: Sustainable management of digestate for growing biomass feedstocks and use as biofertilizer,” *Energies*, vol. 14, 2021.
- [40] E. C. Network, “Compost and digestate for a circular bioeconomy: Overview of bio-waste collection, treatment and markets across europe,” 2022.
- [41] S. B. et al, “Legal requirements for digestate as fertilizer in austria and the european union compared to actual technical parameters,” *Journal of Environmental Management*, vol. 253, 2020.

# Anexo A

## Alineación con los ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible, conocidos como los ODS, son una recopilación de 17 objetivos, relacionados los unos con los otros, que han sido diseñados para ser la guía que la sociedad ha de seguir para lograr un futuro mejor y más sostenible para todos. Fueron establecidos por la asamblea de Naciones Unidas en 2015 con un objetivo de cumplimiento en 2030. Al analizar estos objetivos, se encuentra que la DA se encuentra relacionada con, al menos, 9 de los 17 ODS. Estas contribuciones se muestran en la Tabla [A.1](#).

Si se analizan concretamente las alineaciones del digestato como subproducto (en su uso como fertilizante) de la DA, se pueden encontrar las siguientes contribuciones principales:

### Objetivo 2. Cero Hambre

Los nutrientes que se introducen en un proceso de digestión anaerobia son expulsados del proceso en su totalidad [\[4\]](#) dentro del digestato. Por lo tanto, el uso como fertilizante de este subproducto tiene el potencial de restaurar los nutrientes y contenido en carbono del suelo. Además, el alto contenido en N y P del digestato aumenta el rendimiento de los campos de cultivo con el uso de un fertilizante biológico, por lo que no altera los ciclos naturales del nitrógeno y fósforo. Este hecho contribuye directamente al objetivo 2.3, en el cual se pretende duplicar la producción agrícola mundial en 2030 con el fin de tener suficiente para erradicar el hambre en el mundo.

Además, la clasificación de residuos necesaria como paso previo a la digestión puede reducir la cantidad total de alimentos desperdiciados, lo que puede, a su vez, contribuir a la seguridad alimentaria.

### Objetivo 11. Ciudades y comunidades sostenibles

La gestión adecuada de los residuos urbanos es esencial para tener un entorno urbano saludable. Digerir los residuos de los mercados supondría una gestión eficiente y de bajo impacto.

## Objetivo 13. Acción por el Clima

El objetivo 13 pretende adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Concretamente, la contribución al objetivo es el uso del digestato como biofertilizante, impidiendo así el uso de fertilizantes comerciales en su lugar. Es concretamente esta contribución a los ODS la que se pretende analizar en profundidad en este estudio, ya que se podría obtener una misma calidad de fertilizante sin necesidad de producirlo de manera sintética, evitando así la contaminación que esta producción llevaría. Además, se analizará la contribución del biofertilizante (digestato) y el fertilizante comercial a alteración de los ciclos naturales de nitrógeno y fósforo, de cuyos mecanismos de transformación depende la disponibilidad de estos elementos para todas las formas de vida. Estos ciclos son conocidos como límites planetarios, y contribuyen directamente al cambio climático.

Además, la utilización de residuos agroalimentarios para la generación de energía a través de biogás y fertilizante a través de digestato supondría una reducción de la huella de carbono de esta industria debido al secuestro de carbono en los residuos y las emisiones evitadas en la fabricación de fertilizantes inorgánicos.

## Objetivo 15. Vida de Ecosistemas Terrestres

Este objetivo pretende gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras, detener la pérdida de biodiversidad. A este objetivo afecta de manera directa la recirculación de nutrientes y materia orgánica a través del uso de digestato como fertilizante.

Tabla A.1: Alineación de la Digestión Anaerobia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: [6]

ODS	Definición	Contribución de la D.A.
<b>Objetivo 2: Cero Hambre</b>	Acabar con el hambre en el mundo, conseguir seguridad alimentaria, mejorar la nutrición y promover la agricultura sostenible	Restauración de los suelos mediante el reciclaje de nutrientes, materia orgánica y carbono.
		Aumentar los rendimientos de campos de cultivo utilizando el digestato como fertilizante rico en nutrientes.
		Recirculación del fósforo mediante la aplicación del digestato como fertilizante (que es necesario para el crecimiento de las plantas, pero cuya cantidad es limitada).
<b>Objetivo 3: Salud y Bienestar</b>	Garantizar una vida sana y promover el bienestar en todos los grupos demográficos	Reducción de la contaminación del aire interior, sustituyendo combustibles domésticos basados en la biomasa por biogás.
		Tratamiento de residuos orgánicos para reducir olores y transmisión de enfermedades.
<b>Objetivo 5: Igualdad de género</b>	Lograr la igualdad de género y empoderar a mujeres y niñas	La disponibilidad del biogás doméstico elimina la necesidad de enviar a mujeres a por leña en países en vías de desarrollo.
<b>Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento</b>	Garantizar la disponibilidad del agua, su saneamiento y gestión sostenible para todos	El tratamiento local de biosólidos impiden que estos residuos acaben contaminando las vías acuáticas, reduciendo la sobrecarga de carbono en los ríos, lagos y mares.
<b>Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante</b>	Garantizar el acceso universal a energía asequible, segura, sostenible y moderna.	Reducción de la dependencia de energías fósiles gracias a su reemplazo por biogás.
		El calor residual de equipos de cogeneración puede usarse en la producción de biogás.
		La D.A. es una oportunidad de tener producción de energía a nivel local en zonas rurales y remotas.
		El biogás se puede almacenar para producir energía cuando se necesite, o para compensar la red.
<b>Objetivo 9: Industria, Innovación e Infraestructura</b>	Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación	Incremento de la autosuficiencia de las industrias al poder producir energía a partir de sus efluentes industriales.
		Colaboración de mutuo beneficio entre los sectores de industria y agricultura (al usar biogás como fuente de energía y digestato como fertilizante).
<b>Objetivo 13: Acción por el clima</b>	Optar por medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos	Reducir emisiones de CO <sub>2</sub> mediante el reemplazo de energías fósiles por biogás.
		Reducir emisiones de CO <sub>2</sub> mediante el reemplazo de fertilizantes inorgánicos por digestato.
		Reducción de emisiones de NO <sub>x</sub> de los purines, conservando el nitrógeno en el digestato y
		Reduce la deforestación al sustituir la calefacción por combustión de biomasa.

# Anexo B

## Resultados Brutos del Análisis de Ciclo de Vida

### B.1. Resultados del A.C.V. teniendo en cuenta la infraestructura

Tabla B.1: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante A

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_A	Digestato_A	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,3E-04	0,0E+00	1,27E-04	8,84E-08	5,50E-08	5,41E-08
Abiotic depletion	MJ	2,7E+01	0,0E+00	25,257053	0,13926305	1,4547357	0,057424518
Global warming	kg CO2 eq	2,7E+00	4,5E-02	2,5112483	0,006577333	0,10664601	0,005007431
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,7E-07	0,0E+00	1,53E-07	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,7E+00	1,1E-03	9,7003503	6,19E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,1E+00	0,0E+00	5,0977392	6,31E-03	0,01066771	5,14E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	6,4E+03	0,0E+00	6341,8664	8,36E+00	1,79E+01	9,35E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E-02	0,0E+00	0,011163402	4,44E-05	4,20E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	1,2E-03	7,8E-06	0,001158288	2,46E-06	1,61E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	2,8E-02	1,4E-02	0,013430421	3,36E-05	0,000294548	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	7,9E-03	3,2E-03	0,004612918	1,02E-05	6,24E-05	8,57E-06

Tabla B.2: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante B

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_B	Digestato_B	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,7E-06	0,0E+00	1,46E-06	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,9E+00	0,0E+00	0,26548857	0,13947632	1,4569634	0,057512455
Global warming	kg CO2 eq	1,9E-01	4,5E-02	0,028838406	0,006587405	0,10680932	0,0050151
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,2E-08	0,0E+00	1,65E-09	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,4E-01	1,1E-03	0,11105008	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	8,0E-02	0,0E+00	0,058059617	6,32E-03	0,010684046	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+02	0,0E+00	69,678558	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-04	0,0E+00	0,000126074	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	4,1E-05	7,8E-06	1,31887E-05	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,00013864	3,36E-05	0,000294999	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,3E-03	3,2E-03	4,95729E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,58E-06

Tabla B.3: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante C

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_C	Digestato_C	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,8E-06	0,0E+00	1,57E-06	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,9E+00	0,0E+00	0,28559907	0,13947558	1,4569557	0,05751215
Global warming	kg CO2 eq	1,9E-01	4,5E-02	0,030875388	0,00658737	0,10680875	0,005015073
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,2E-08	0,0E+00	1,77E-09	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,4E-01	1,1E-03	0,11946195	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	8,5E-02	0,0E+00	0,062457576	6,32E-03	0,010683989	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+02	0,0E+00	74,95664	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-04	0,0E+00	0,000135624	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	4,2E-05	7,8E-06	1,41584E-05	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,000149141	3,36E-05	0,000294997	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4-- eq	3,3E-03	3,2E-03	5,3328E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,58E-06

Tabla B.4: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante D

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_D	Digestato_D	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	2,1E-05	0,0E+00	2,11E-05	8,86E-08	5,51E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	5,5E+00	0,0E+00	3,8484429	0,1395404	1,4576328	0,057538878
Global warming	kg CO2 eq	5,5E-01	4,5E-02	0,38908254	0,006590432	0,10685839	0,005017404
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	4,4E-08	0,0E+00	2,39E-08	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,6E+00	1,1E-03	1,6097357	6,20E-03	1,34E-02	3,68E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	8,6E-01	0,0E+00	0,84161484	6,33E-03	0,010688955	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,0E+03	0,0E+00	1010,0395	8,37E+00	1,79E+01	9,37E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,0E-03	0,0E+00	0,00182753	4,45E-05	4,21E-05	5,25E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,1E-04	7,8E-06	0,000185391	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,7E-02	1,5E-02	0,002009678	3,37E-05	0,000295134	3,76E-05
Eutrophication	kg PO4-- eq	4,0E-03	3,2E-03	0,000718594	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.5: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante E

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_E	Digestato_E	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	7,7E-07	0,0E+00	5,73E-07	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	6,9E+00	0,0E+00	5,2956538	0,13948116	1,4570141	0,057514454
Global warming	kg CO2 eq	6,2E-01	4,5E-02	0,45921751	0,006587634	0,10681303	0,005015274
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	4,4E-08	0,0E+00	2,42E-08	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	2,0E-01	1,1E-03	0,18057276	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,8E-01	0,0E+00	0,15590387	6,32E-03	0,010684417	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	7,5E+02	0,0E+00	714,34475	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	7,0E-04	0,0E+00	0,000559553	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	1,5E-04	7,8E-06	0,000122162	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,8E-02	1,5E-02	0,00332884	3,36E-05	0,000295009	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4-- eq	4,0E-03	3,2E-03	0,000745961	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.6: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante F

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_F	Digestato_F	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-07	0,0E+00	3,57E-07	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,7E+00	0,0E+00	0,064990047	0,13948025	1,4570045	0,057514078
Global warming	kg CO2 eq	1,7E-01	4,5E-02	0,008252823	0,006587591	0,10681233	0,005015241
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,0E-08	0,0E+00	4,03E-10	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	5,2E-02	1,1E-03	0,027185114	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,6E-02	0,0E+00	0,014212654	6,32E-03	0,010684348	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,3E+01	0,0E+00	17,056903	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,7E-04	0,0E+00	3,08622E-05	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	3,1E-05	7,8E-06	3,45895E-06	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	3,39382E-05	3,36E-05	0,000295007	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,3E-03	3,2E-03	1,21352E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.7: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante G

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_G	Digestato_G	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,6E-06	0,0E+00	1,45E-06	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,9E+00	0,0E+00	0,26400977	0,13947754	1,4569762	0,05751296
Global warming	kg CO2 eq	1,9E-01	4,5E-02	0,028159531	0,006587463	0,10681026	0,005015144
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,2E-08	0,0E+00	1,64E-09	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,3E-01	1,1E-03	0,11043151	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	8,0E-02	0,0E+00	0,057736219	6,32E-03	0,01068414	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,0E+02	0,0E+00	69,290442	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,6E-04	0,0E+00	0,000125372	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	4,1E-05	7,8E-06	1,30008E-05	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,000137867	3,36E-05	0,000295001	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,3E-03	3,2E-03	4,92968E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,58E-06

Tabla B.8: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante H

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_H	Digestato_H	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	3,7E-06	0,0E+00	3,55E-06	8,85E-08	5,51E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	2,3E+00	0,0E+00	0,64606745	0,13949388	1,4571469	0,057519697
Global warming	kg CO2 eq	2,3E-01	4,5E-02	0,067161167	0,006588235	0,10682277	0,005015731
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,4E-08	0,0E+00	4,00E-09	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	2,9E-01	1,1E-03	0,27023942	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,6E-01	0,0E+00	0,1412883	6,32E-03	0,010685391	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,1E+02	0,0E+00	169,56304	8,37E+00	1,79E+01	9,37E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	4,5E-04	0,0E+00	0,000306801	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	5,9E-05	7,8E-06	3,14925E-05	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,00033738	3,36E-05	0,000295036	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,4E-03	3,2E-03	0,000120636	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.9: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante I

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_I	Digestato_I	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,2E-06	0,0E+00	1,05E-06	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,8E+00	0,0E+00	0,19062469	0,13948521	1,4570563	0,057516121
Global warming	kg CO2 eq	1,8E-01	4,5E-02	0,020864044	0,006587825	0,10681613	0,005015419
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,1E-08	0,0E+00	1,18E-09	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,0E-01	1,1E-03	0,079735832	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	6,4E-02	0,0E+00	0,041687657	6,32E-03	0,010684727	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	8,6E+01	0,0E+00	50,030227	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,3E-04	0,0E+00	9,05229E-05	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	3,7E-05	7,8E-06	9,49266E-06	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	9,95453E-05	3,36E-05	0,000295017	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,3E-03	3,2E-03	3,55941E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.10: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante J

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_J	Digestato_J	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	3,2E-06	0,0E+00	2,97E-06	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	2,2E+00	0,0E+00	0,54095657	0,13947049	1,4569025	0,057510051
Global warming	kg CO2 eq	2,2E-01	4,5E-02	0,056224193	0,00658713	0,10680486	0,00501489
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,3E-08	0,0E+00	3,35E-09	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	2,5E-01	1,1E-03	0,2262734	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,4E-01	0,0E+00	0,11830163	6,32E-03	0,010683599	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,8E+02	0,0E+00	141,97626	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	4,0E-04	0,0E+00	0,000256887	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	5,4E-05	7,8E-06	2,63598E-05	2,47E-06	1,61E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,00028249	3,36E-05	0,000294986	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,4E-03	3,2E-03	0,000101009	1,03E-05	6,25E-05	8,58E-06

Tabla B.11: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante K

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_K	Digestato_K	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	2,9E-06	0,0E+00	2,72E-06	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	2,1E+00	0,0E+00	0,49502792	0,13948988	1,4571051	0,05751805
Global warming	kg CO2 eq	2,1E-01	4,5E-02	0,051565111	0,006588046	0,10681971	0,005015588
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,3E-08	0,0E+00	3,07E-09	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	2,3E-01	1,1E-03	0,20706226	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,3E-01	0,0E+00	0,10825751	6,32E-03	0,010685085	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,7E+02	0,0E+00	129,9221	8,37E+00	1,79E+01	9,37E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,7E-04	0,0E+00	0,000235076	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	5,2E-05	7,8E-06	2,41435E-05	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,000258506	3,36E-05	0,000295027	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,4E-03	3,2E-03	9,24333E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.12: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante L

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_L	Digestato_L	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	4,4E-07	0,0E+00	2,39E-07	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,7E+00	0,0E+00	0,043494377	0,13948059	1,4570081	0,057514218
Global warming	kg CO2 eq	1,7E-01	4,5E-02	0,006104077	0,006587607	0,10681259	0,005015253
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,0E-08	0,0E+00	2,70E-10	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	4,3E-02	1,1E-03	0,018193847	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,2E-02	0,0E+00	0,009511772	6,32E-03	0,010684373	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	4,7E+01	0,0E+00	11,415277	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,6E-04	0,0E+00	2,06544E-05	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	3,0E-05	7,8E-06	2,42913E-06	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	2,2713E-05	3,36E-05	0,000295008	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4-- eq	3,3E-03	3,2E-03	8,12142E-06	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.13: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante M

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_M	Digestato_M	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	3,1E-06	0,0E+00	2,87E-06	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	2,2E+00	0,0E+00	0,52360651	0,13946484	1,4568436	0,057507724
Global warming	kg CO2 eq	2,2E-01	4,5E-02	0,054523447	0,006586864	0,10680053	0,005014687
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,3E-08	0,0E+00	3,25E-09	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	2,4E-01	1,1E-03	0,21901619	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,4E-01	0,0E+00	0,11450735	6,32E-03	0,010683167	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,7E+02	0,0E+00	137,42266	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,9E-04	0,0E+00	0,000248648	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	5,3E-05	7,8E-06	2,55354E-05	2,47E-06	1,61E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,00027343	3,36E-05	0,000294974	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4-- eq	3,4E-03	3,2E-03	9,77696E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,58E-06

Tabla B.14: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante N

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_N	Digestato_N	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	MJ	7,5E+00	0,0E+00	5,80E+00	1,39E-01	1,46E+00	5,75E-02
Global warming	kg CO2 eq	6,7E-01	4,5E-02	0,50250436	0,006587639	0,1068131	0,005015277
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	4,6E-08	0,0E+00	2,64682E-08	1,55113E-09	1,80931E-08	2,66299E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	2,2E-01	1,1E-03	1,97E-01	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,9E-01	0,0E+00	0,17039704	6,32E-03	1,07E-02	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	8,2E+02	0,0E+00	781,8323	8,37E+00	17,895387	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	7,5E-04	0,0E+00	0,000612024	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	1,6E-04	7,8E-06	0,000133658	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,9E-02	1,5E-02	0,003648783	3,36E-05	2,95E-04	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4-- eq	4,1E-03	3,2E-03	0,000816563	1,03E-05	6,24709E-05	8,59E-06

Tabla B.15: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante O

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_ O	Digestato_ O	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	6,1E-07	0,0E+00	4,17E-07	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,7E+00	0,0E+00	0,075954869	0,13947823	1,4569834	0,057513244
Global warming	kg CO2 eq	1,7E-01	4,5E-02	0,009382452	0,006587496	0,10681079	0,005015168
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,0E-08	0,0E+00	4,71E-10	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	5,6E-02	1,1E-03	0,031771504	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,9E-02	0,0E+00	0,016610548	6,32E-03	0,010684193	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,6E+01	0,0E+00	19,934665	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,8E-04	0,0E+00	3,60691E-05	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	3,2E-05	7,8E-06	3,9918E-06	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	3,9664E-05	3,36E-05	0,000295003	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,3E-03	3,2E-03	1,42E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.16: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante P

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_ P	Digestato_ P	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	6,1E-07	0,0E+00	4,12E-07	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,7E+00	0,0E+00	0,074974499	0,13948213	1,4570241	0,057514851
Global warming	kg CO2 eq	1,7E-01	4,5E-02	0,009272923	0,00658768	0,10681377	0,005015309
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,0E-08	0,0E+00	4,65E-10	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	5,6E-02	1,1E-03	0,031361419	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,9E-02	0,0E+00	0,016396151	6,32E-03	0,010684491	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,5E+01	0,0E+00	19,677363	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,7E-04	0,0E+00	3,56035E-05	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	3,2E-05	7,8E-06	3,94292E-06	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	3,91521E-05	3,36E-05	0,000295011	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,3E-03	3,2E-03	1,40E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.17: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante Q

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_ Q	Digestato_ Q	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,2E-07	0,0E+00	3,23E-07	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,7E+00	0,0E+00	0,058808608	0,13948005	1,4570024	0,057513994
Global warming	kg CO2 eq	1,7E-01	4,5E-02	0,007933208	0,006587582	0,10681218	0,005015234
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,0E-08	0,0E+00	3,64E-10	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	4,9E-02	1,1E-03	0,02459953	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,5E-02	0,0E+00	0,012860837	6,32E-03	0,010684332	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,1E+01	0,0E+00	15,434559	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,7E-04	0,0E+00	2,79267E-05	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	3,1E-05	7,8E-06	3,22876E-06	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	3,07102E-05	3,36E-05	0,000295006	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,3E-03	3,2E-03	1,10E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.18: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante R

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_R	Digestato_R	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,5E-06	0,0E+00	1,29E-06	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,9E+00	0,0E+00	0,23548777	0,13948667	1,4570715	0,057516724
Global warming	kg CO2 eq	1,9E-01	4,5E-02	0,025450835	0,006587894	0,10681725	0,005015472
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,1E-08	0,0E+00	1,46E-09	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,2E-01	1,1E-03	0,098501265	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	7,4E-02	0,0E+00	0,051498752	6,32E-03	0,010684839	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	9,7E+01	0,0E+00	61,804727	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,5E-04	0,0E+00	0,00011827	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	3,9E-05	7,8E-06	1,16654E-05	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,000122973	3,36E-05	0,00029502	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4-- eq	3,3E-03	3,2E-03	4,40E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.19: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante S

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_S	Digestato_S	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	2,8E-06	0,0E+00	2,64E-06	8,85E-08	5,51E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	2,1E+00	0,0E+00	0,48116643	0,13949189	1,4571261	0,057518876
Global warming	kg CO2 eq	2,1E-01	4,5E-02	0,050561971	0,006588141	0,10682124	0,005015666
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,3E-08	0,0E+00	2,98E-09	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	2,3E-01	1,1E-03	0,20126427	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,3E-01	0,0E+00	0,10522614	6,32E-03	0,010685239	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,6E+02	0,0E+00	126,28409	8,37E+00	1,79E+01	9,37E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,7E-04	0,0E+00	0,000228494	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	5,1E-05	7,8E-06	2,35628E-05	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,000251268	3,36E-05	0,000295032	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4-- eq	3,4E-03	3,2E-03	8,98E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.20: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante T

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_T	Digestato_T	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	3,7E-07	0,0E+00	1,72E-07	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,9E+00	0,0E+00	0,25847882	0,13948042	1,4570063	0,057514148
Global warming	kg CO2 eq	1,9E-01	4,5E-02	0,024439156	0,006587599	0,10681246	0,005015247
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,1E-08	0,0E+00	1,22E-09	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	4,3E-02	1,1E-03	0,019133032	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,5E-02	0,0E+00	0,012692502	6,32E-03	0,010684361	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	7,4E+01	0,0E+00	38,292953	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,8E-04	0,0E+00	3,72279E-05	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	3,5E-05	7,8E-06	6,95748E-06	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,000159799	3,36E-05	0,000295007	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4-- eq	3,3E-03	3,2E-03	3,76E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.21: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante U

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_U	Digestato_U	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,3E-06	0,0E+00	1,1E-06	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,9E+00	0,0E+00	2,0E-01	0,13947402	1,4569394	0,057511508
Global warming	kg CO2 eq	1,9E-01	4,5E-02	2,2E-02	0,006587297	0,10680756	0,005015017
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,1E-08	0,0E+00	1,2E-09	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,1E-01	1,1E-03	8,4E-02	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	6,6E-02	0,0E+00	4,4E-02	6,32E-03	0,01068387	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	8,8E+01	0,0E+00	5,3E-01	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,3E-04	0,0E+00	9,5E-05	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	3,8E-05	7,8E-06	1,0E-05	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	1,0E-04	3,36E-05	0,000294994	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,3E-03	3,2E-03	3,8E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,58E-06

Tabla B.22: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante V

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_V	Digestato_V	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,7E-07	0,0E+00	3,7E-07	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,7E+00	0,0E+00	6,7E-02	0,13947817	1,4569827	0,057513218
Global warming	kg CO2 eq	1,7E-01	4,5E-02	8,9E-03	0,006587493	0,10681074	0,005015166
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,0E-08	0,0E+00	4,2E-10	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	5,2E-02	1,1E-03	2,8E-02	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,7E-02	0,0E+00	1,5E-02	6,32E-03	0,010684188	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,3E+01	0,0E+00	1,8E+01	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,7E-04	0,0E+00	3,2E-05	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	3,1E-05	7,8E-06	3,6E-06	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	3,5E-05	3,36E-05	0,000295003	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,3E-03	3,2E-03	1,3E-05	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

Tabla B.23: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante W

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos				
			Compost_W	Digestato_W	Composting site construction	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	4,5E-07	0,0E+00	2,6E-07	8,85E-08	5,50E-08	5,42E-08
Abiotic depletion	MJ	1,7E+00	0,0E+00	4,7E-02	0,13947983	1,4570001	0,057513904
Global warming	kg CO2 eq	1,7E-01	4,5E-02	6,4E-03	0,006587571	0,10681201	0,005015226
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,0E-08	0,0E+00	2,9E-10	1,55E-09	1,81E-08	2,66E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	4,4E-02	1,1E-03	2,0E-02	6,20E-03	1,34E-02	3,67E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,2E-02	0,0E+00	1,0E-02	6,32E-03	0,010684315	5,15E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	4,8E+01	0,0E+00	1,2E+01	8,37E+00	1,79E+01	9,36E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,6E-04	0,0E+00	2,2E-05	4,45E-05	4,21E-05	5,24E-05
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	3,0E-05	7,8E-06	2,6E-06	2,47E-06	1,62E-05	1,38E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	2,4E-05	3,36E-05	0,000295006	3,75E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,3E-03	3,2E-03	8,7E-06	1,03E-05	6,25E-05	8,59E-06

## B.2. Resultados del A.C.V. excluyendo la infraestructura

Tabla B.24: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante A

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_A	Digestato_A	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,9E-08	0,0E+00	1,35E-08	5,16E-09	3,38E-10
Abiotic depletion	MJ	3,6E+00	0,0E+00	2,1745108	1,3785625	0,054575022
Global warming	kg CO2 eq	3,4E-01	4,5E-02	0,18840296	0,099959148	0,004749215
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,8E-08	0,0E+00	9,74E-09	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	6,7E-02	1,1E-03	0,058357852	6,60E-03	1,46E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,2E-02	0,0E+00	0,049356479	0,00112924	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,0E+02	0,0E+00	285,91729	4,23E+00	7,18E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-04	0,0E+00	0,000207693	2,22E-05	5,21E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	7,2E-05	7,8E-06	4,95051E-05	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,6E-02	1,4E-02	0,001373708	0,000267992	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,5E-03	3,2E-03	0,000302068	5,05E-05	7,58E-06

Tabla B.25: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante B

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_B	Digestato_B	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3806736	0,054658596
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,002113862	0,10011222	0,004756487
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,6605E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001130969	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	4,22046E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268403	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.26: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante C

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_C	Digestato_C	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3806663	0,054658307
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,002126487	0,10011169	0,004756462
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,66143E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001130963	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	4,2475E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268401	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.27: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante D

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_D	Digestato_D	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3813079	0,054683708
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,001691543	0,10015822	0,004758673
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,36774E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001131489	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	3,29509E-07	1,39E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268526	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0	5,06E-05	7,60E-06

Tabla B.28: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante E

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_E	Digestato_E	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	3,7E-08	0,0E+00	3,17E-08	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	6,6E+00	0,0E+00	5,1191074	1,3807216	0,054660496
Global warming	kg CO2 eq	5,9E-01	4,5E-02	0,44305567	0,1001157	0,004756653
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	4,1E-08	0,0E+00	2,29E-08	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,5E-01	1,1E-03	0,13738158	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,2E-01	0,0E+00	0,11619217	0,001131009	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	6,8E+02	0,0E+00	673,08992	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,2E-04	0,0E+00	0,000488039	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	1,4E-04	7,8E-06	0,000116483	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,8E-02	1,5E-02	0,003233904	0,000268412	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	4,0E-03	3,2E-03	0,000711111	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.29: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante F

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_F	Digestato_F	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3807126	0,054660139
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,001710812	0,10011505	0,004756622
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,39849E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001131001	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	3,3375E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,00026841	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.30: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante G

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_G	Digestato_G	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3806857	0,054659076
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,001583846	0,1001131	0,004756529
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,42543E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001130979	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	3,05323E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268405	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.31: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante H

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_H	Digestato_H	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3808474	0,054665479
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,002126887	0,10012483	0,004757086
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,67775E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001131112	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	4,24831E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268437	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.32: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante I

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_I	Digestato_I	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3807616	0,05466208
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,001675429	0,1001186	0,004756791
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,35162E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001131041	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	3,26041E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,00026842	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.33: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante J

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_J	Digestato_J	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3806159	0,054656311
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,001770559	0,10010804	0,004756289
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,45378E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001130922	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	3,4669E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268392	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.34: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante K

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_K	Digestato_K	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3808079	0,054663913
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,001734735	0,10012196	0,00475695
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,42356E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001131079	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	3,38911E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268429	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.35: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante L

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_L	Digestato_L	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3807159	0,054660271
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,001725857	0,10011529	0,004756633
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,27877E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001131004	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	3,376E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268411	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.36: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante M

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_M	Digestato_M	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,38056	0,0546541
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,0018163	0,10010399	0,004756096
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,51006E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001130876	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	3,56605E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268381	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.37: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante N

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_N	Digestato_N	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	4,0E-08	0,0E+00	3,47E-08	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	7,0E+00	0,0E+00	5,61E+00	1,38E+00	5,47E-02
Global warming	kg CO2 eq	6,3E-01	4,5E-02	0,48495403	0,10011576	0,004756656
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	4,3E-08	0,0E+00	2,51137E-08	1,76792E-08	2,4489E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,6E-01	1,1E-03	1,50E-01	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,3E-01	0,0E+00	0,12723176	1,13E-03	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	7,5E+02	0,0E+00	737,0412	4,2400468	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,6E-04	0,0E+00	0,000535394	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	1,5E-04	7,8E-06	0,00012751	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,8E-02	1,5E-02	0,003541163	2,68E-04	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	4,0E-03	3,2E-03	0,000778675	5,06058E-05	7,59E-06

Tabla B.38: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante O

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_O	Digestato_O	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3806925	0,054659346
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,001736702	0,1001136	0,004756553
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,415E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001130985	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	3,39338E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268407	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0,00E+00	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.39: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante P

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_P	Digestato_P	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3807311	0,054660873
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,001725859	0,10011639	0,004756686
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,27944E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001131016	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	3,376E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268414	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4-- eq	3,2E-03	3,2E-03	0,00E+00	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.40: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante Q

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_Q	Digestato_Q	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3807106	0,05466006
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,00201343	0,1001149	0,004756615
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,41852E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001131	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	4,00809E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,00026841	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4-- eq	3,2E-03	3,2E-03	0,00E+00	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.41: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante R

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_R	Digestato_R	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3807761	0,054662653
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,001746224	0,10011965	0,00475684
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,42132E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001131053	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	3,41404E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268423	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0,00E+00	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.42: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante S

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_S	Digestato_S	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,00E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0	1,3808277	0,054664698
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	0,002126917	0,1001234	0,004757018
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,00E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,67022E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0	0,001131096	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	4,2484E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0	0,000268433	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,2E-03	3,2E-03	0,00E+00	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.43: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante T

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost_T	Digestato_T	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	6,9E-09	0,0E+00	1,39E-09	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,7E+00	0,0E+00	0,22389893	1,3807142	0,054660205
Global warming	kg CO2 eq	1,7E-01	4,5E-02	0,021028686	0,10011517	0,004756627
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,9E-08	0,0E+00	1,00E-09	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	1,5E-02	1,1E-03	0,006009667	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	7,5E-03	0,0E+00	0,005082	0,001131003	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	4,1E+01	0,0E+00	29,439529	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	4,9E-05	0,0E+00	2,13851E-05	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,8E-05	7,8E-06	5,41756E-06	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,000141444	0,000268411	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4--- eq	3,3E-03	3,2E-03	3,11E-05	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.44: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante U

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost _ U	Digestato _ U	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,0E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,3806509	0,054657697
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	2,1E-03	0,10011057	0,004756409
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,0E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,7E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0,0E+00	0,001130951	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0,0E+00	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0,0E+00	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	4,2E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,0E+00	0,000268398	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4 <sup>---</sup> eq	3,2E-03	3,2E-03	0,0E+00	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.45: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante V

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost _ V	Digestato _ V	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,0E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,3806919	0,054659321
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	2,1E-03	0,10011355	0,004756551
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,0E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,7E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0,0E+00	0,001130984	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0,0E+00	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0,0E+00	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	4,2E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,0E+00	0,000268406	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4 <sup>---</sup> eq	3,2E-03	3,2E-03	0,0E+00	5,06E-05	7,59E-06

Tabla B.46: Resultados obtenidos para 1 kg de Biofertilizante W

Categoría de impacto	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos			
			Compost _ W	Digestato _ W	Machine operation, diesel	Electricity, low voltage {ES}
Abiotic depletion	kg Sb eq	5,5E-09	0,0E+00	0,0E+00	5,17E-09	3,39E-10
Abiotic depletion	MJ	1,4E+00	0,0E+00	0,0E+00	1,3807084	0,054659972
Global warming	kg CO2 eq	1,5E-01	4,5E-02	1,7E-03	0,10011474	0,004756607
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,8E-08	0,0E+00	0,0E+00	1,77E-08	2,45E-10
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	9,1E-03	1,1E-03	9,3E-07	6,61E-03	1,47E-03
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-03	0,0E+00	0,0E+00	0,001130998	1,24E-03
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E+01	0,0E+00	0,0E+00	4,24E+00	7,19E+00
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-05	0,0E+00	0,0E+00	2,22E-05	5,22E-06
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	2,3E-05	7,8E-06	3,4E-07	1,38E-05	1,24E-06
Acidification	kg SO2 eq	1,5E-02	1,5E-02	0,0E+00	0,00026841	3,45E-05
Eutrophication	kg PO4-- eq	3,2E-03	3,2E-03	0,0E+00	5,06E-05	7,59E-06

### B.3. Resultados del A.C.V. de los fertilizantes inorgánicos

Tabla B.47: Resultados obtenidos para 1 kg de fertilizante NPK 15-1-3

Categoría de impacto NPK 15-1-3	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos		
			Inorganic N	Inorganic P	Inorganic K
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,9E-05	1,7E-05	4,93E-07	2,00E-06
Abiotic depletion	MJ	1,4E+01	1,2E+01	0,33112501	1,3631544
Global warming	kg CO2 eq	8,5E-01	7,3E-01	0,024190836	9,61E-02
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,0E-07	8,7E-08	2,54E-09	1,11E-08
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	8,9E-01	7,7E-01	0,023598701	9,49E-02
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,3E-01	4,6E-01	0,014896843	5,70E-02
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	8,3E+02	7,1E+02	30,41125	8,83E+01
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,3E-03	1,9E-03	0,000114844	2,38E-04
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	1,5E-04	1,3E-04	4,87264E-06	1,54E-05
Acidification	kg SO2 eq	4,3E-03	3,7E-03	0,000141152	4,76E-04
Eutrophication	kg PO4-- eq	1,2E-03	1,1E-03	3,95196E-05	1,35E-04

Tabla B.48: Resultados obtenidos para 1 kg de fertilizante NPK 2-0-3

Categoría de impacto NPK 2-0-3	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos		
			Inorganic N	Inorganic P	Inorganic K
Abiotic depletion	kg Sb eq	4,2E-06	2,2E-06	0	2,00E-06
Abiotic depletion	MJ	2,9E+00	1,6E+00	0	1,3631544
Global warming	kg CO2 eq	1,9E-01	9,8E-02	0	9,61E-02
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,3E-08	1,2E-08	0	1,11E-08
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	2,0E-01	1,0E-01	0	9,49E-02
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,2E-01	6,2E-02	0	5,70E-02
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,8E+02	9,5E+01	0	8,83E+01
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,0E-04	2,6E-04	0	2,38E-04
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	3,2E-05	1,7E-05	0	1,54E-05
Acidification	kg SO2 eq	9,7E-04	5,0E-04	0	4,76E-04
Eutrophication	kg PO4-- eq	2,8E-04	1,4E-04	0	1,35E-04

Tabla B.49: Resultados obtenidos para 1 kg de fertilizante NPK 7-0-3

Categoría de impacto NPK 7-0-3	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos		
			Inorganic N	Inorganic P	Inorganic K
Abiotic depletion	kg Sb eq	9,8E-06	7,8E-06	0	2,00E-06
Abiotic depletion	MJ	6,9E+00	5,5E+00	0	1,3631544
Global warming	kg CO2 eq	4,4E-01	3,4E-01	0	9,61E-02
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	5,2E-08	4,1E-08	0	1,11E-08
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	4,6E-01	3,6E-01	0	9,49E-02
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,7E-01	2,2E-01	0	5,70E-02
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	4,2E+02	3,3E+02	0	8,83E+01
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,1E-03	9,0E-04	0	2,38E-04
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	7,4E-05	5,9E-05	0	1,54E-05
Acidification	kg SO2 eq	2,2E-03	1,7E-03	0	4,76E-04
Eutrophication	kg PO4-- eq	6,3E-04	4,9E-04	0	1,35E-04

Tabla B.50: Resultados obtenidos para 1 kg de fertilizante NPK 6-0-3

Categoría de impacto NPK 6-0-3	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos		
			Inorganic N	Inorganic P	Inorganic K
Abiotic depletion	kg Sb eq	8,7E-06	6,7E-06	0	2,00E-06
Abiotic depletion	MJ	6,1E+00	4,7E+00	0	1,3631544
Global warming	kg CO2 eq	3,9E-01	2,9E-01	0	9,61E-02
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	4,6E-08	3,5E-08	0	1,11E-08
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	4,0E-01	3,1E-01	0	9,49E-02
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	2,4E-01	1,9E-01	0	5,70E-02
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,7E+02	2,8E+02	0	8,83E+01
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,0E-03	7,7E-04	0	2,38E-04
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	6,6E-05	5,1E-05	0	1,54E-05
Acidification	kg SO2 eq	2,0E-03	1,5E-03	0	4,76E-04
Eutrophication	kg PO4-- eq	5,6E-04	4,2E-04	0	1,35E-04

Tabla B.51: Resultados obtenidos para 1 kg de fertilizante NPK 9-0-3

Categoría de impacto NPK 9-0-3	Unidad	Total	Procesos que contribuyen a los impactos		
			Inorganic N	Inorganic P	Inorganic K
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,2E-05	1,0E-05	0	2,00E-06
Abiotic depletion	MJ	8,5E+00	7,1E+00	0	1,3631544
Global warming	kg CO2 eq	5,4E-01	4,4E-01	0	9,61E-02
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	6,4E-08	5,2E-08	0	1,11E-08
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	5,6E-01	4,6E-01	0	9,49E-02
Fresh water ecotox.	kg 1,4-DB eq	3,3E-01	2,8E-01	0	5,70E-02
Marine ecotox.	kg 1,4-DB eq	5,2E+02	4,3E+02	0	8,83E+01
Terrestrial ecotox.	kg 1,4-DB eq	1,4E-03	1,2E-03	0	2,38E-04
Photochemical ox.	kg C2H4 eq	9,1E-05	7,6E-05	0	1,54E-05
Acidification	kg SO2 eq	2,7E-03	2,2E-03	0	4,76E-04
Eutrophication	kg PO4 <sup>3-</sup> eq	7,7E-04	6,3E-04	0	1,35E-04

## Anexo C

# Impacto de la infraestructura de los procesos en los resultados finales

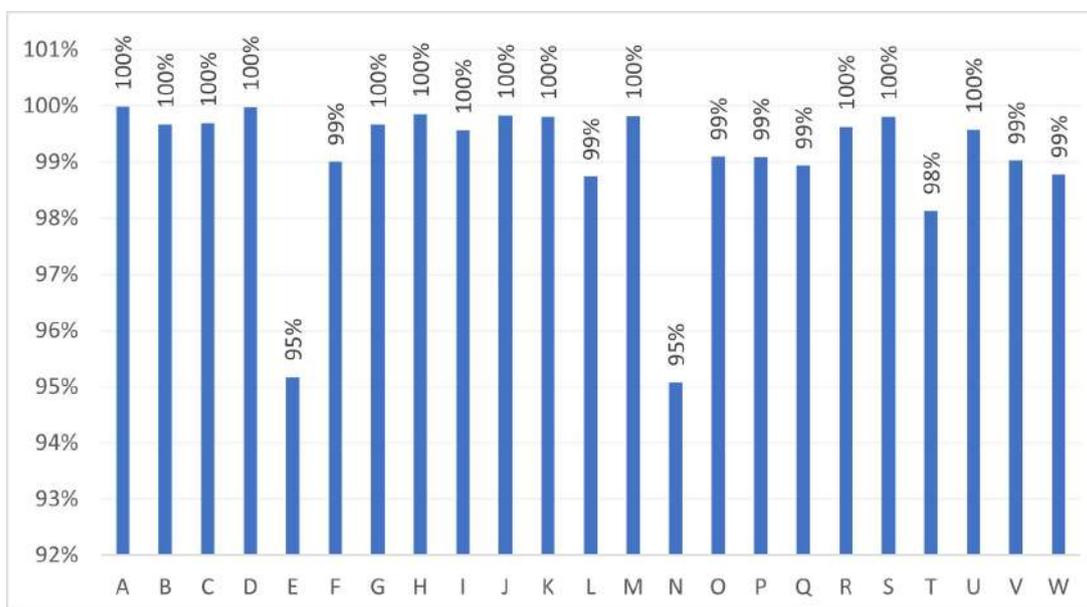


Figura C.1: Impacto de la infraestructura sobre los resultados de agotamiento de recursos naturales (kg Sb eq.)

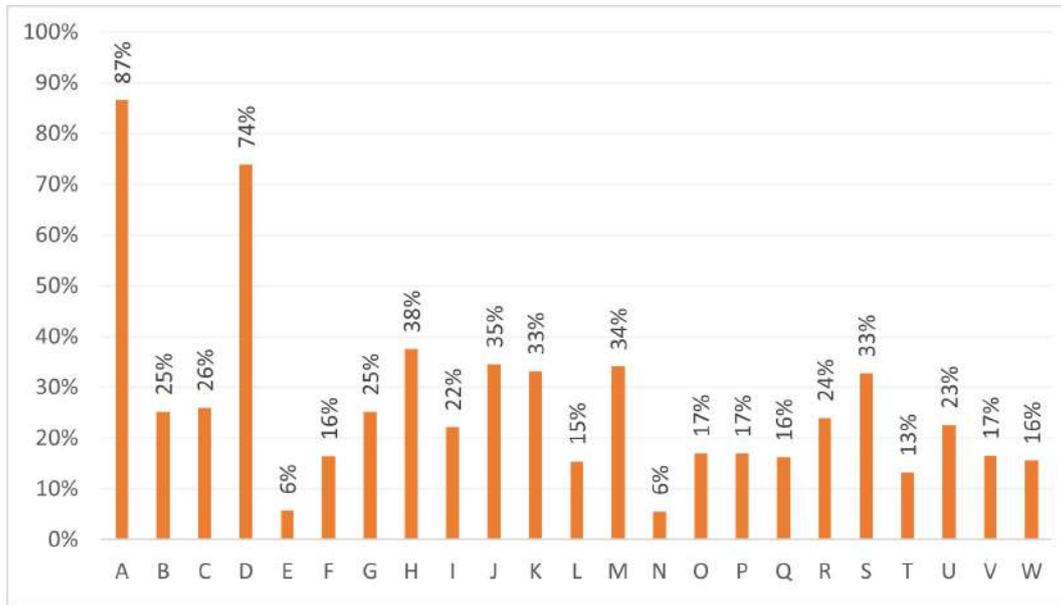


Figura C.2: Impacto de la infraestructura sobre los resultados de agotamiento de combustibles fósiles (MJ)

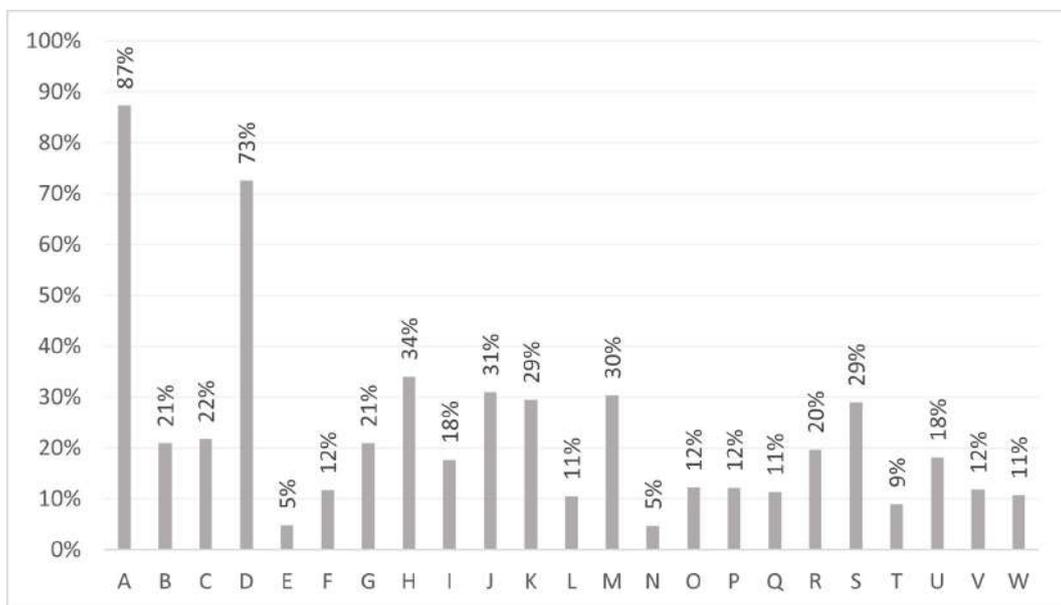


Figura C.3: Impacto de la infraestructura sobre los resultados de contribución al calentamiento global (kg CO<sub>2</sub> eq.)

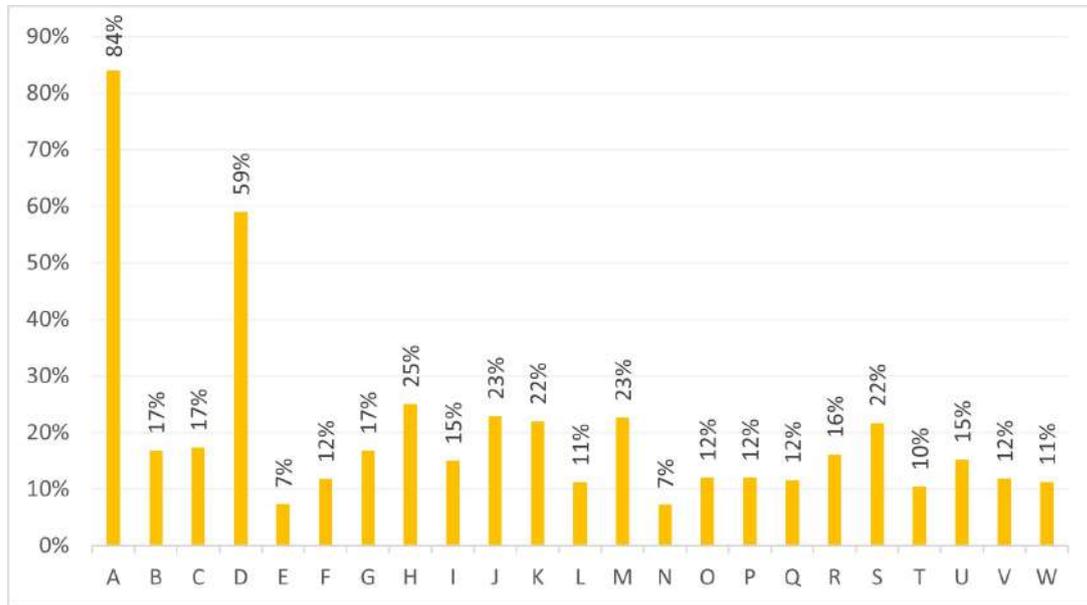


Figura C.4: Impacto de la infraestructura en los resultados de destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq.)

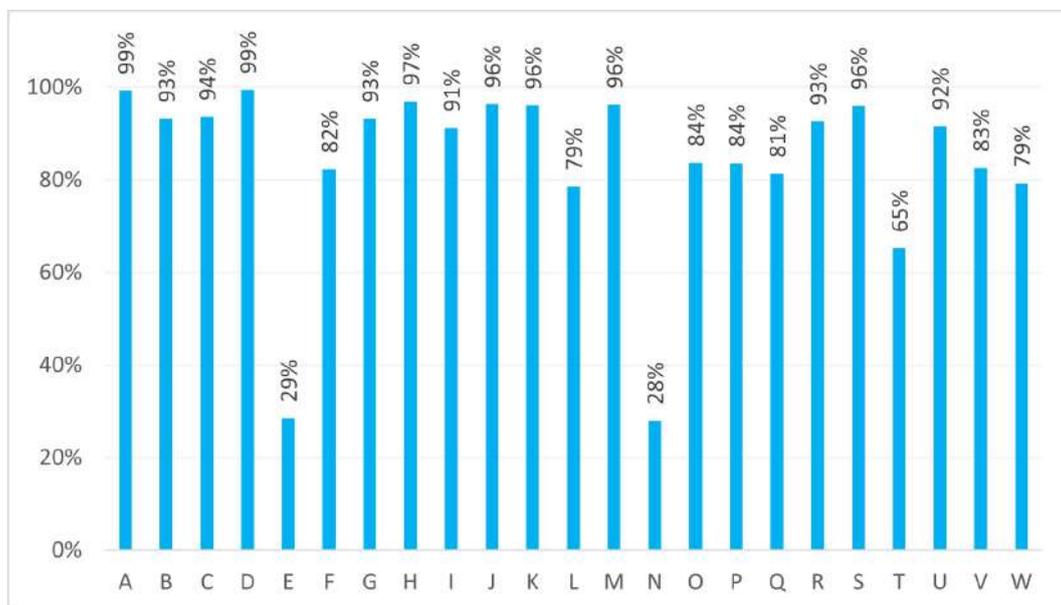


Figura C.5: Impacto de la infraestructura en los resultados de toxicidad humana (kg DCB-1,4 eq.)



Figura C.6: Impacto da la infraestructura en los resultados de toxicidad del medio acuático (kg DCB-1,4 eq.)

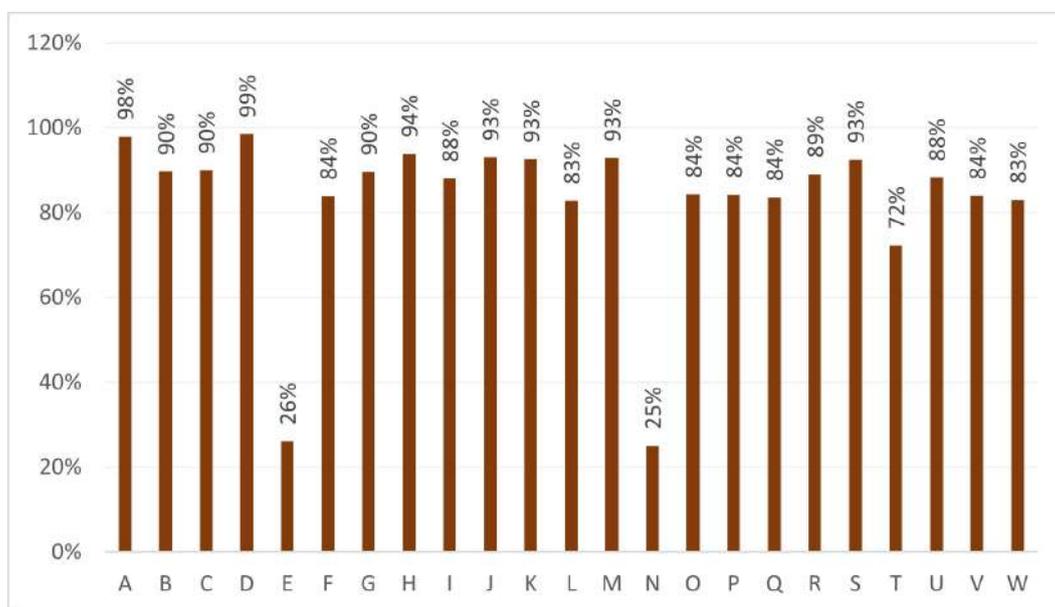


Figura C.7: Impacto da la infraestructura en los resultados de toxicidad del medio terrestre (kg DCB-1,4 eq.)

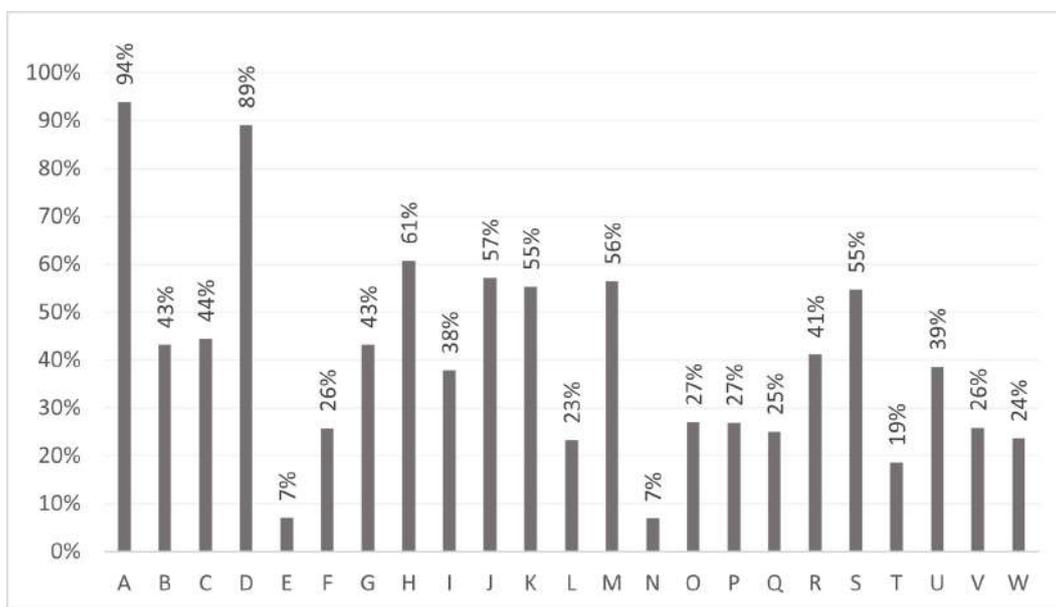


Figura C.8: Impacto da la infraestructura en los resultados oxidación fotoquímica (kg  $C_2H_4$  eq.)

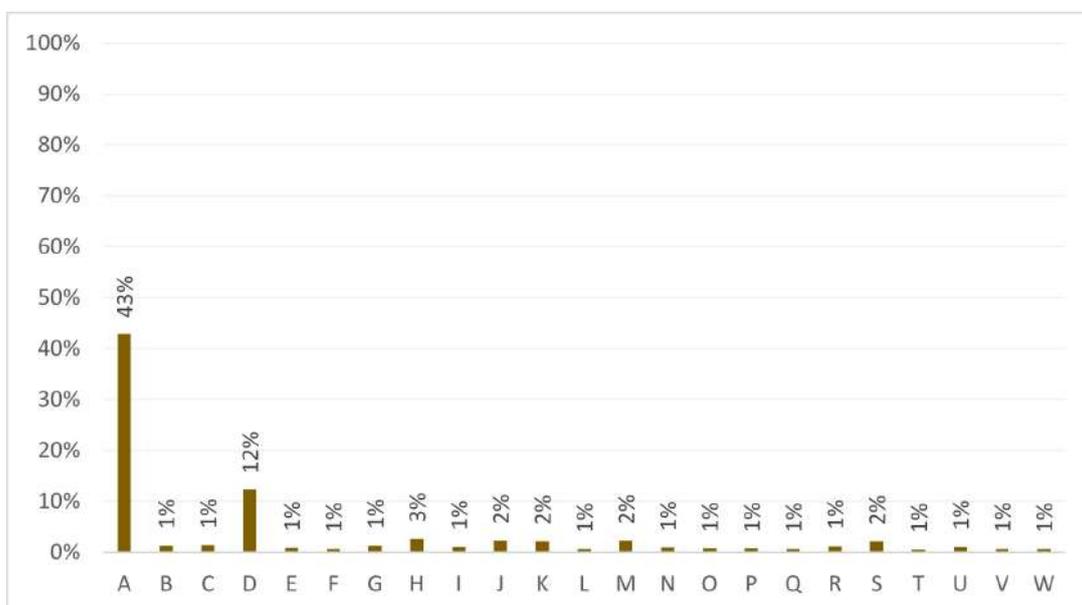


Figura C.9: Impacto da la infraestructura en los resultados de acidificación (kg  $SO_2$  eq.)

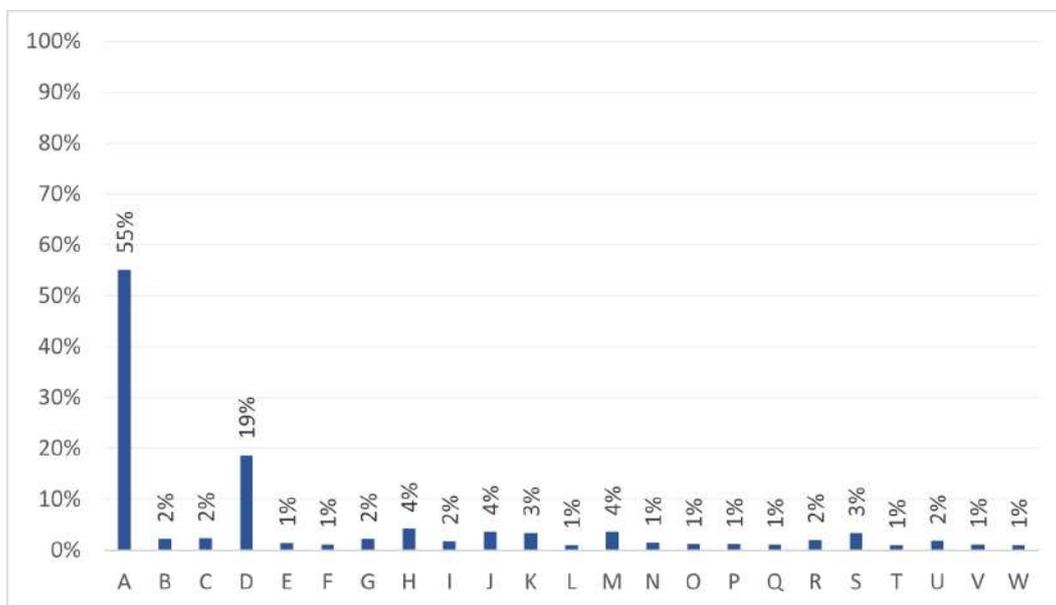


Figura C.10: Impacto da la infraestructura en los resultados de eutrofización (kg  $PO_4$  eq).

## Anexo D

# Resultados de fertilizantes inorgánicos por categoría de impacto

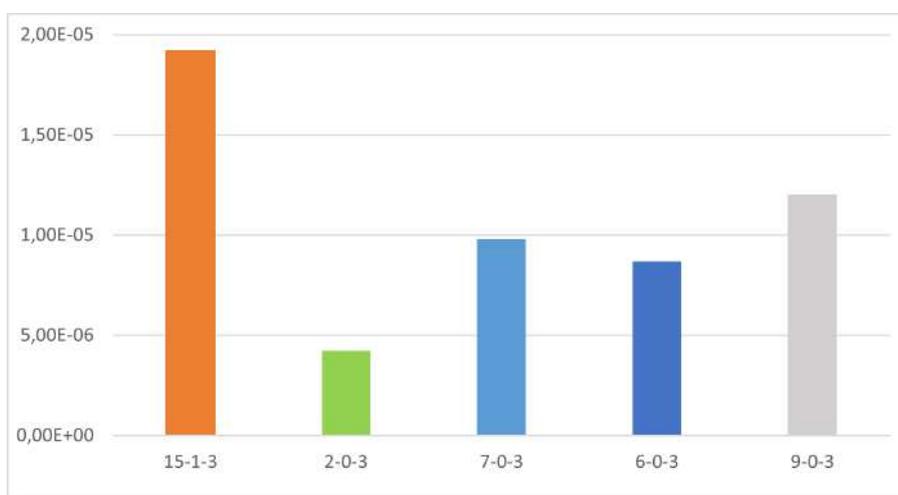


Figura D.1: Agotamiento de recursos naturales (kg Sb eq.) de los fertilizantes inorgánicos

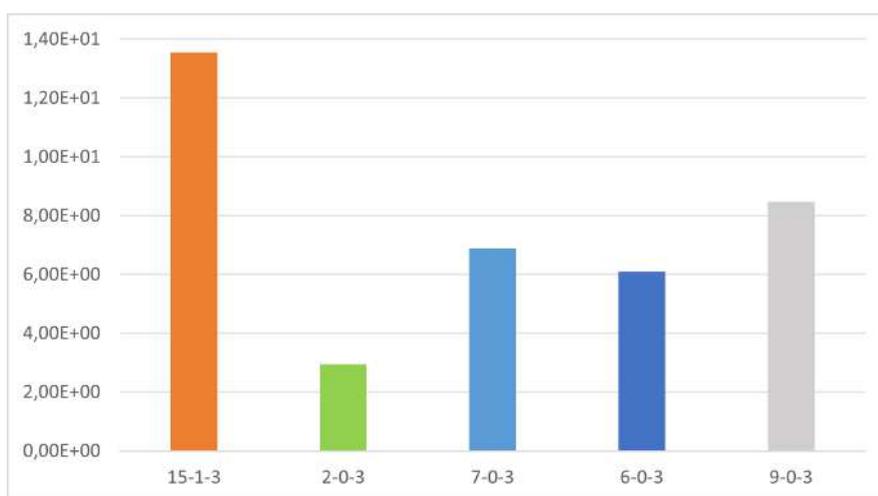


Figura D.2: Agotamiento de recursos fósiles (MJ) de los fertilizantes inorgánicos

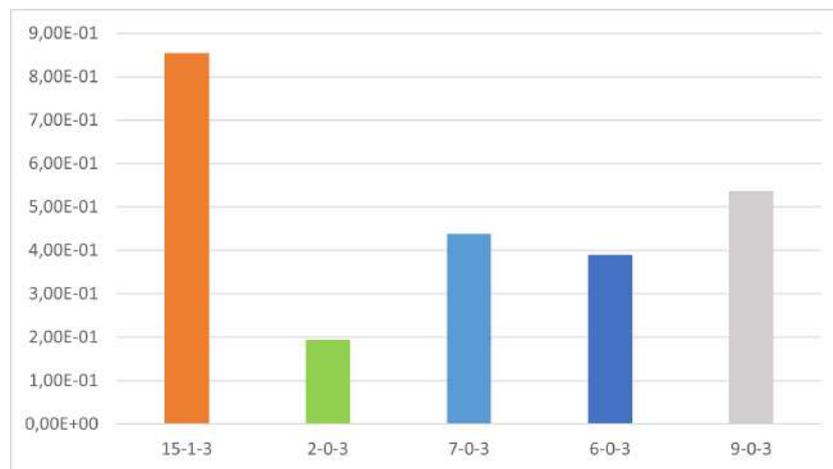


Figura D.3: Resultados de potencial de calentamiento global (kg CO<sub>2</sub> eq.) de los fertilizantes inorgánicos

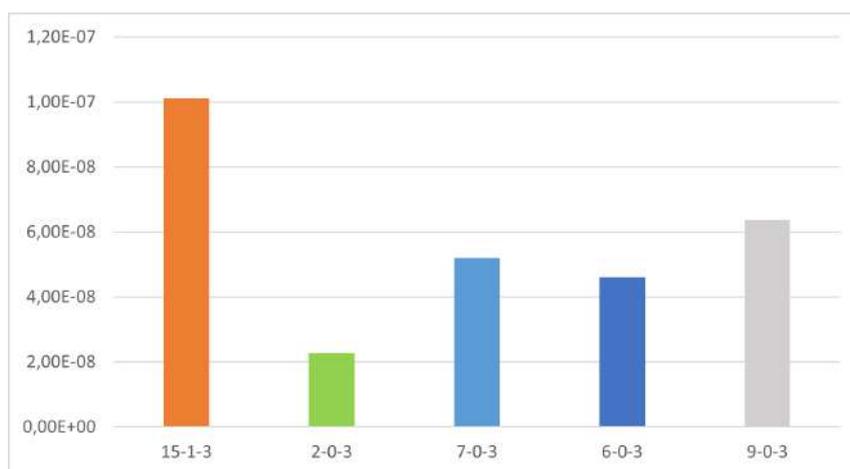


Figura D.4: Resultados de destrucción de la capa de ozono (kg CFC-11 eq.) de los fertilizantes inorgánicos

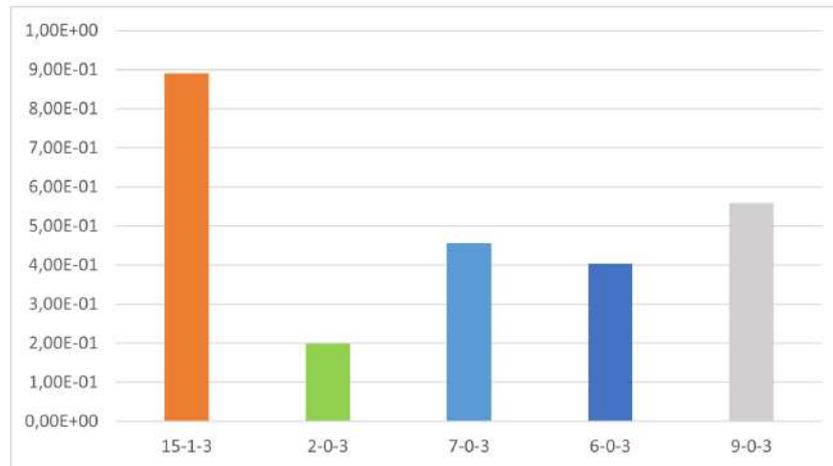


Figura D.5: Resultados de toxicidad en humanos (kg DCB-1,4 eq.) de los fertilizantes inorgánicos

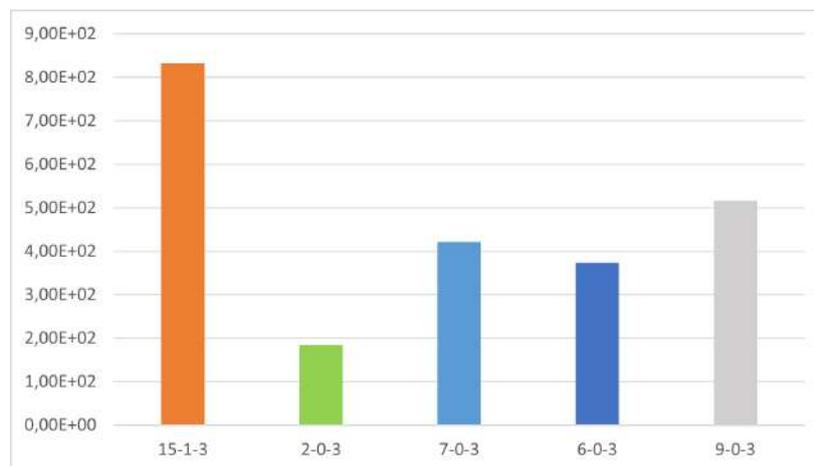


Figura D.6: Resultados de toxicidad del medio acuático (kg DCB-1,4 eq.) de los fertilizantes inorgánicos

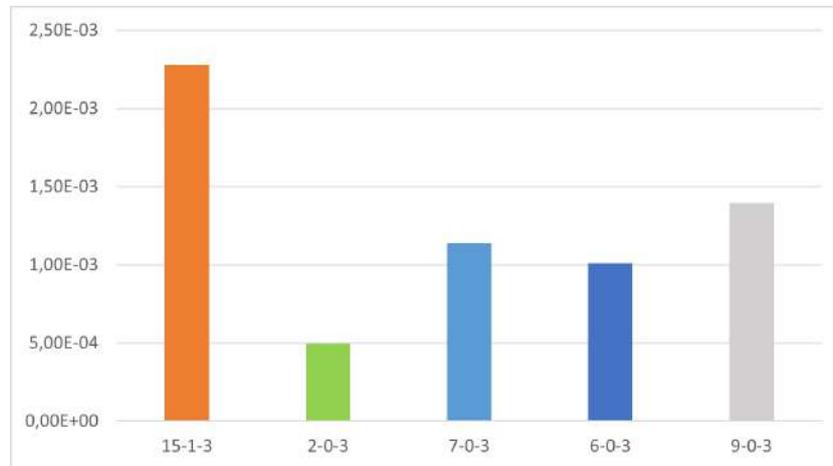


Figura D.7: Resultados de toxicidad del medio terrestre (kg DCB-1,4 eq.) de los fertilizantes inorgánicos

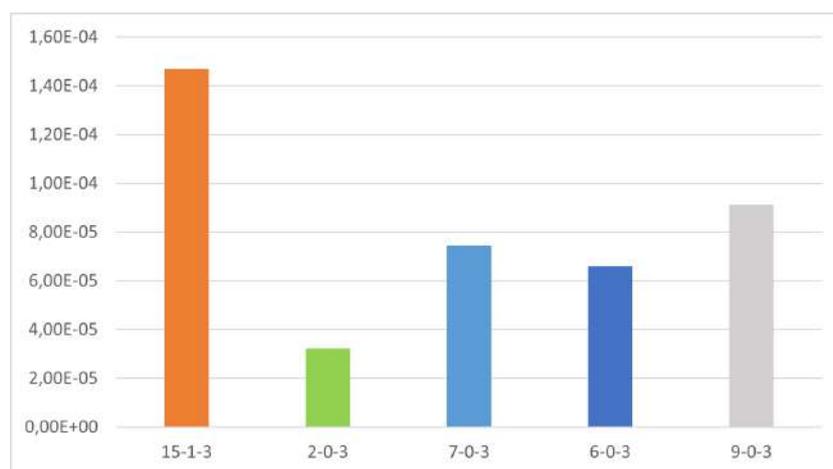


Figura D.8: Resultados de oxidación fotoquímica (kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq.) de los fertilizantes inorgánicos

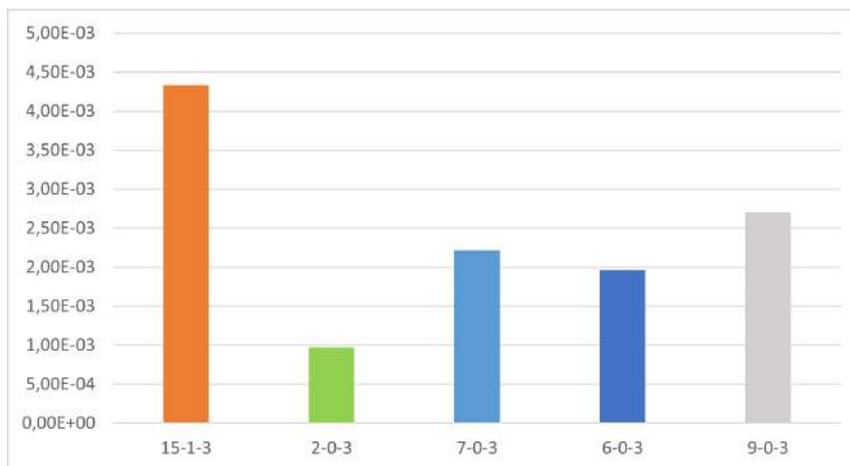


Figura D.9: Resultados de acidificación (kg  $SO_2$  eq.) de los fertilizantes inorgánicos

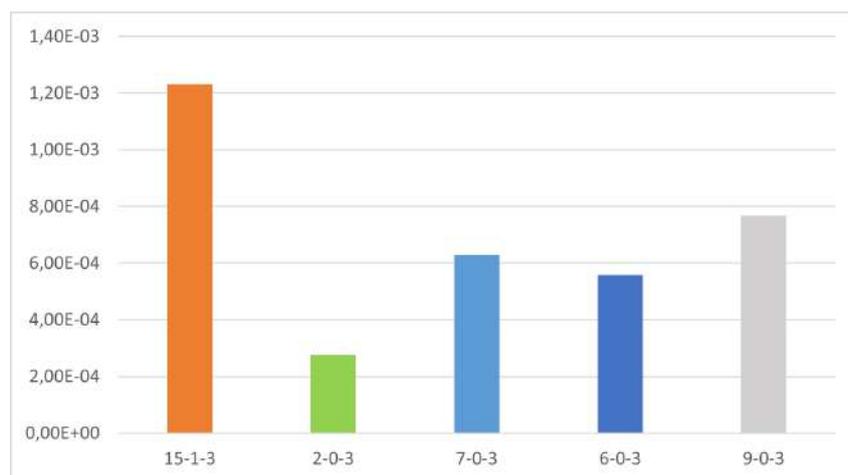


Figura D.10: Resultados de eutrofización (kg  $PO_4$  eq.) de los fertilizantes inorgánicos

## Anexo E

# Comparación de impactos entre el fertilizante inorgánico y el biofertilizante para el resto de mercados

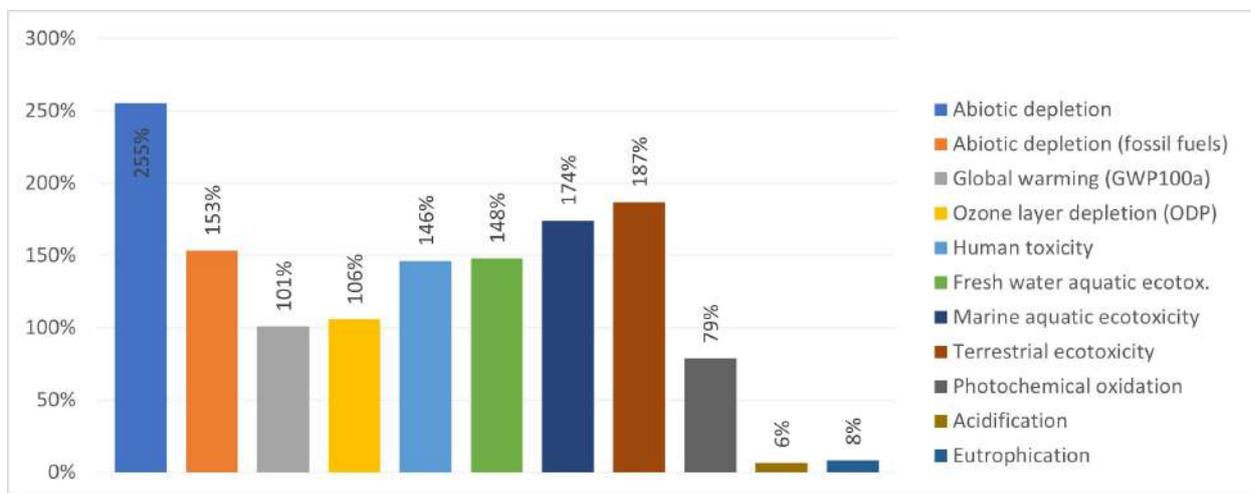


Figura E.1: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado B

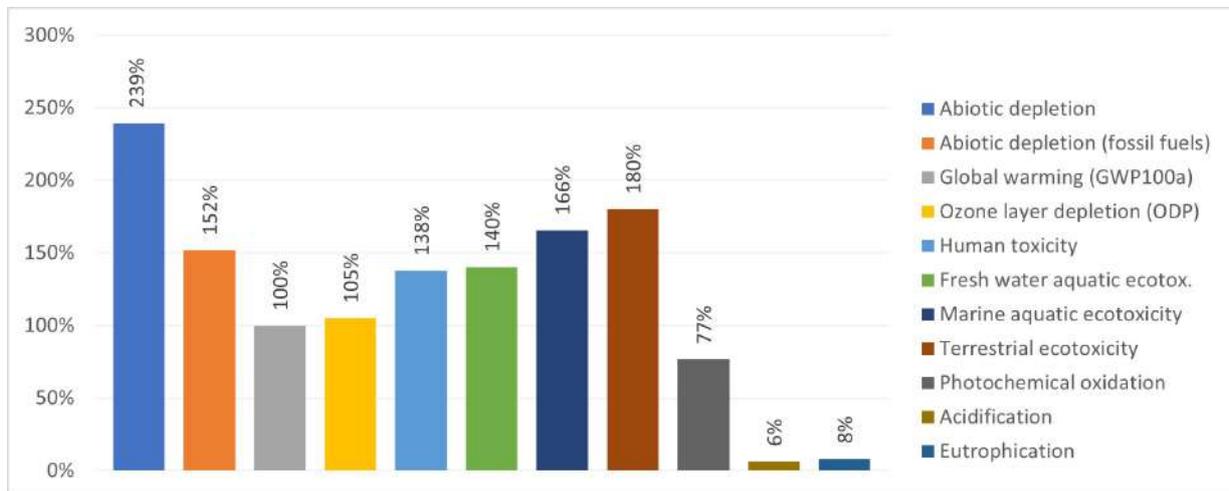


Figura E.2: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado C

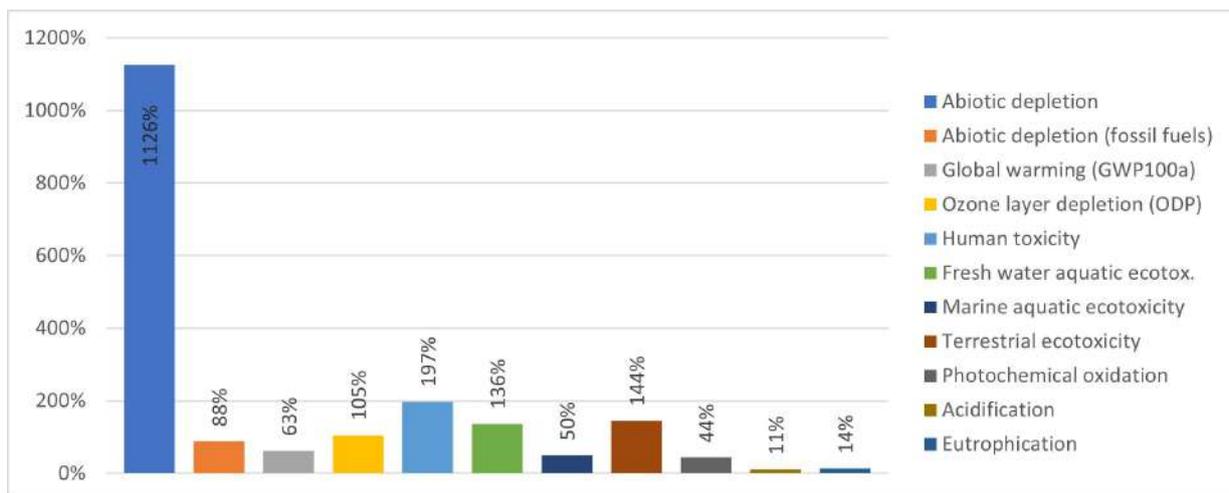


Figura E.3: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado E

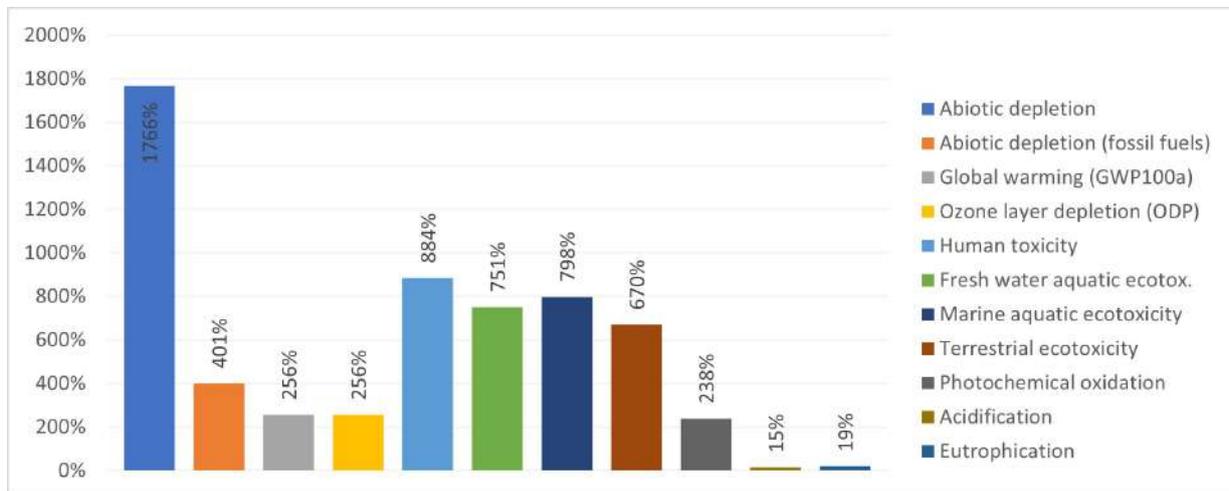


Figura E.4: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado F

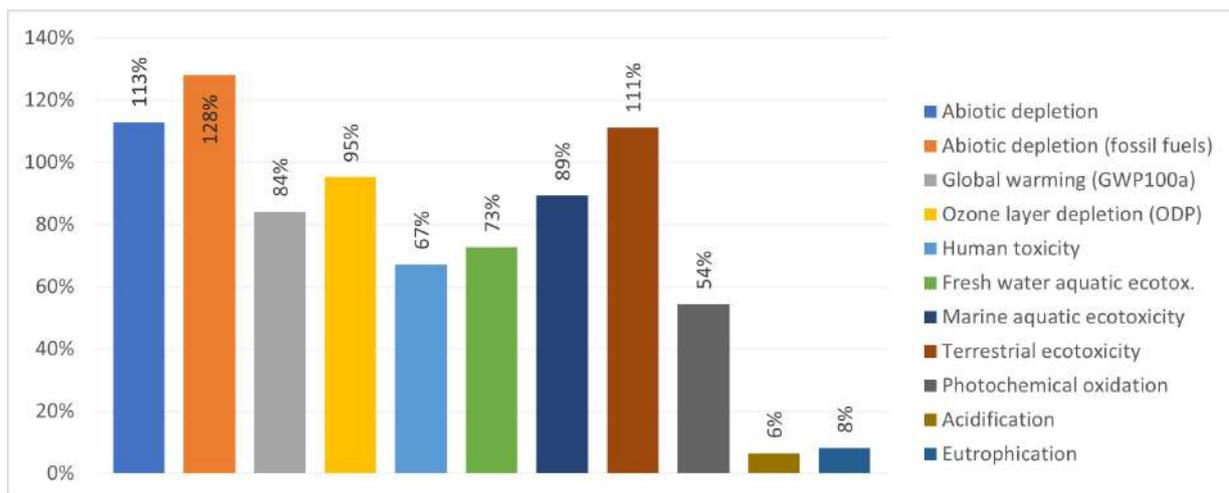


Figura E.5: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado H

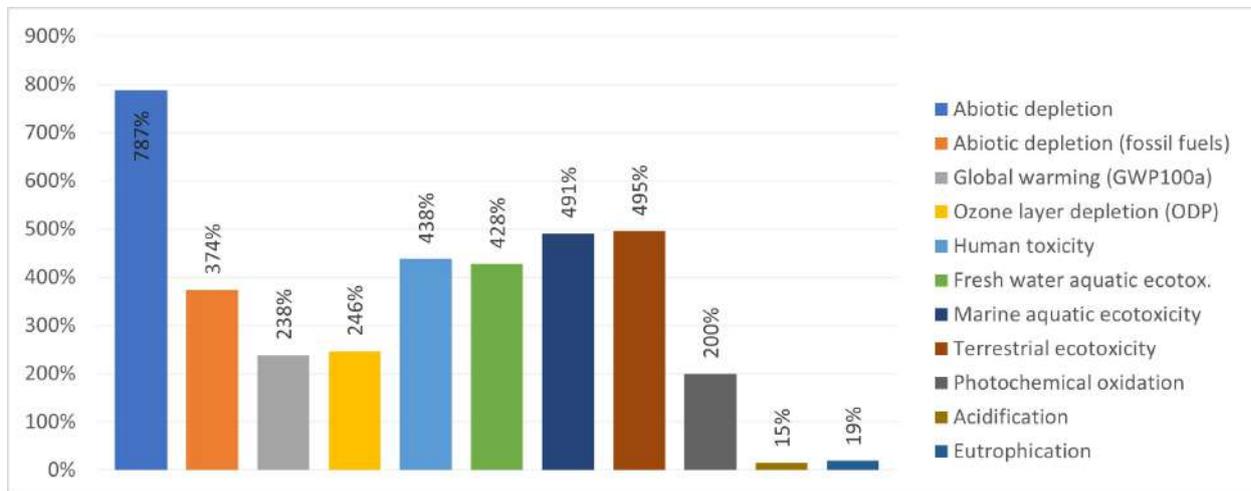


Figura E.6: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado I

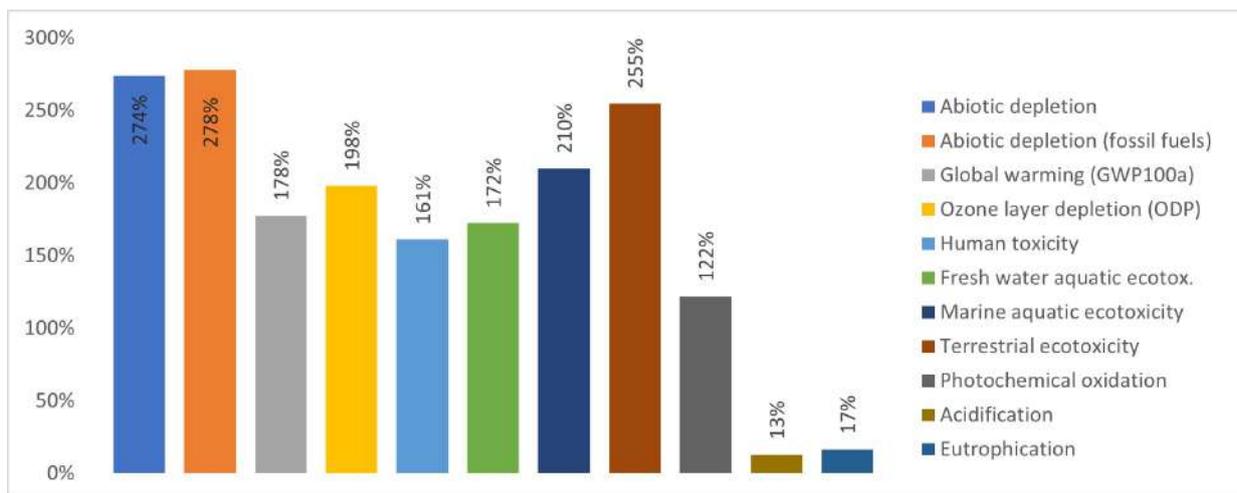


Figura E.7: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado J

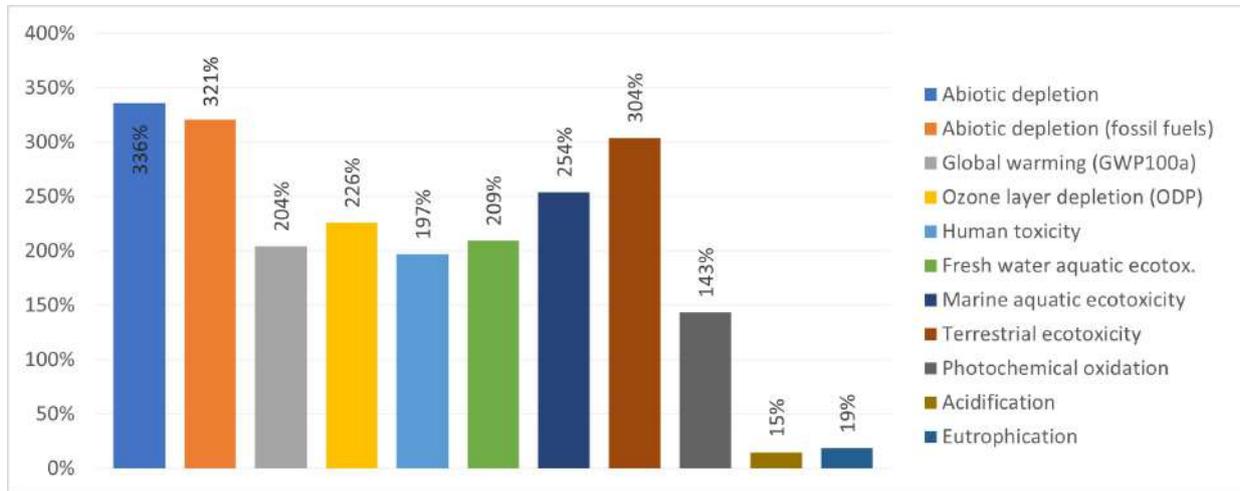


Figura E.8: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado K

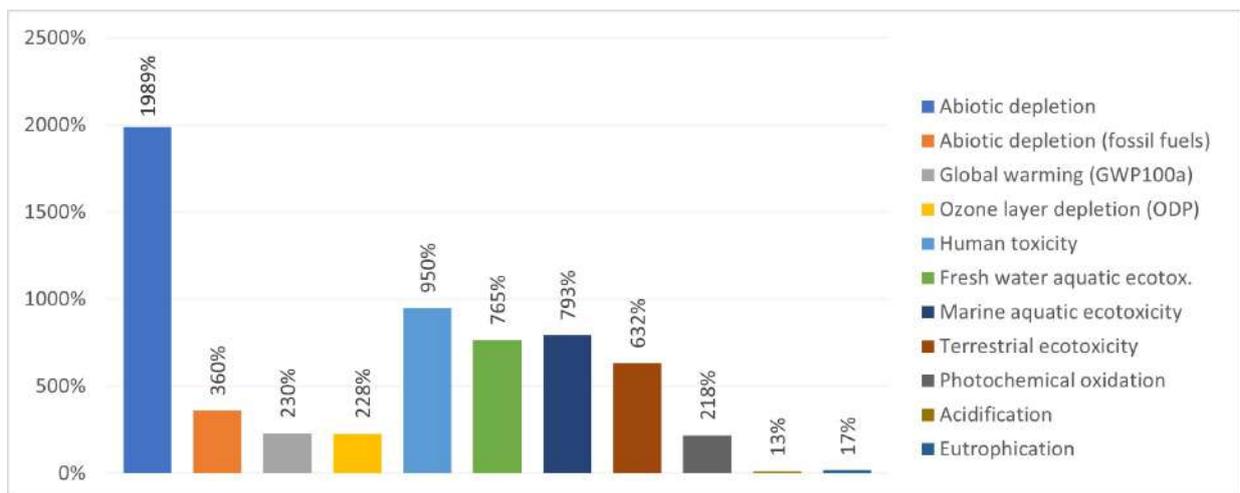


Figura E.9: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado L

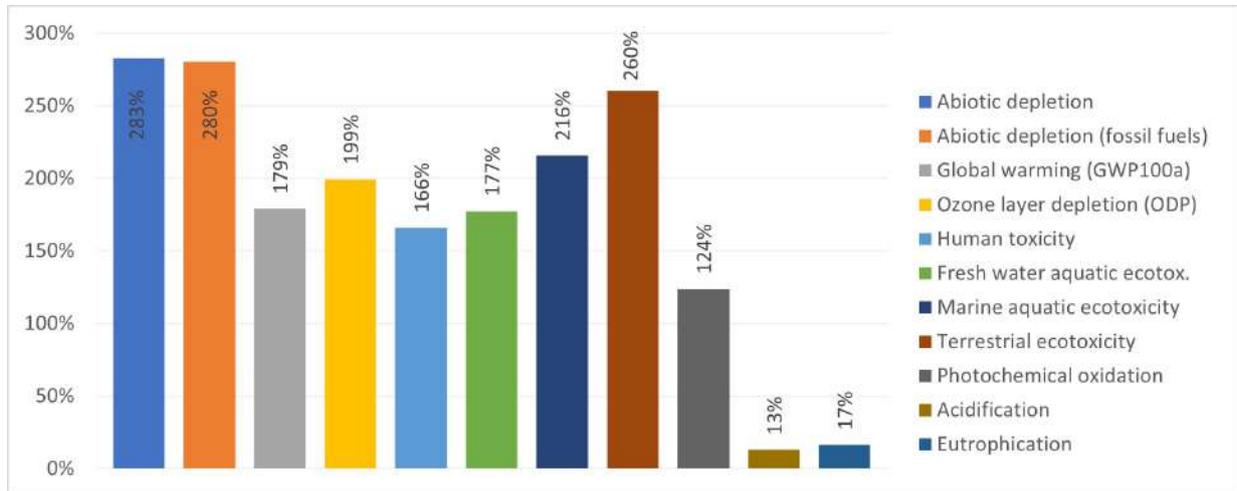


Figura E.10: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado M

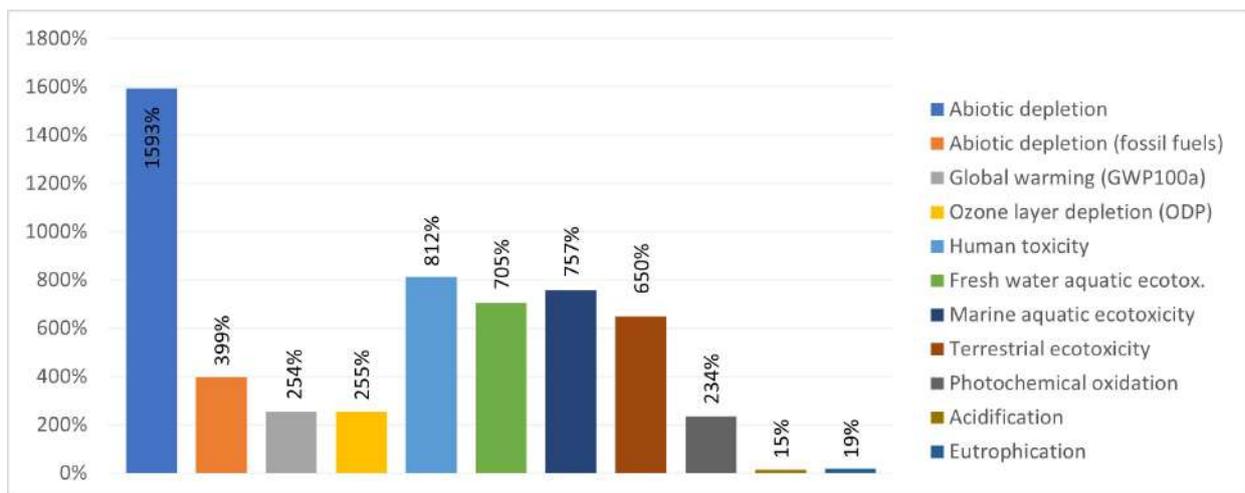


Figura E.11: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado O

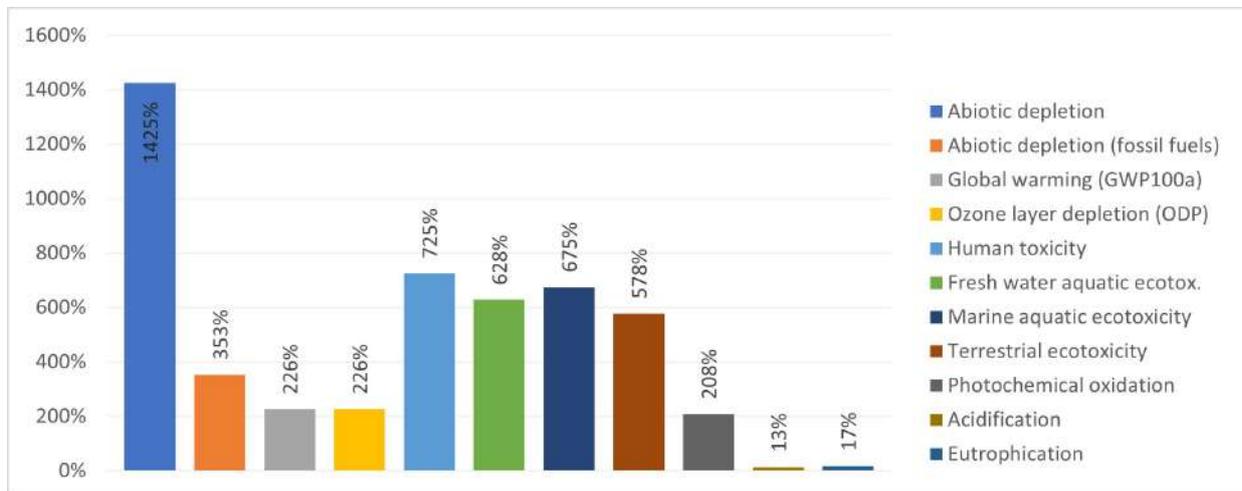


Figura E.12: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado P

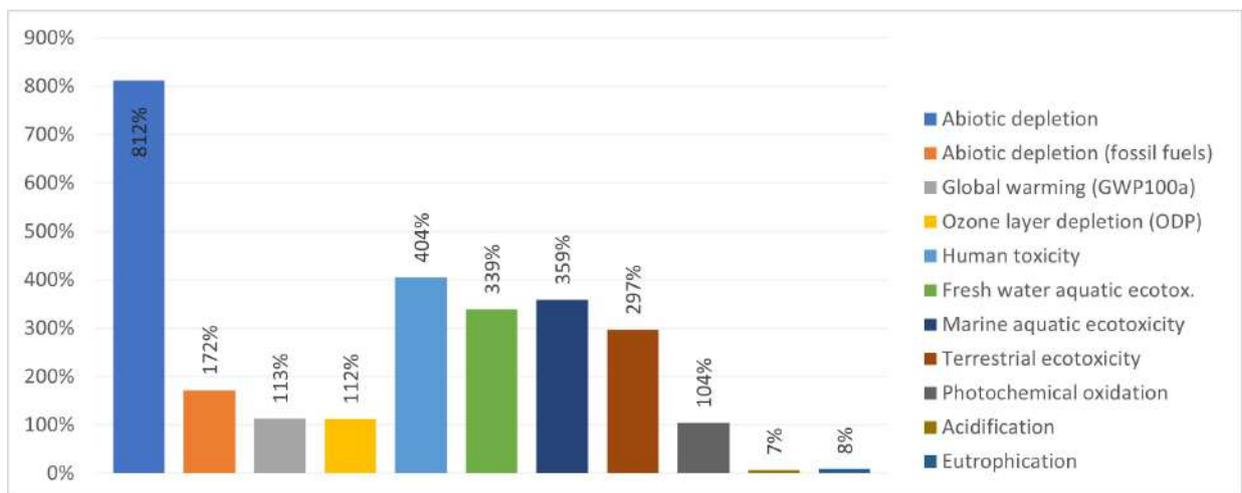


Figura E.13: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado Q

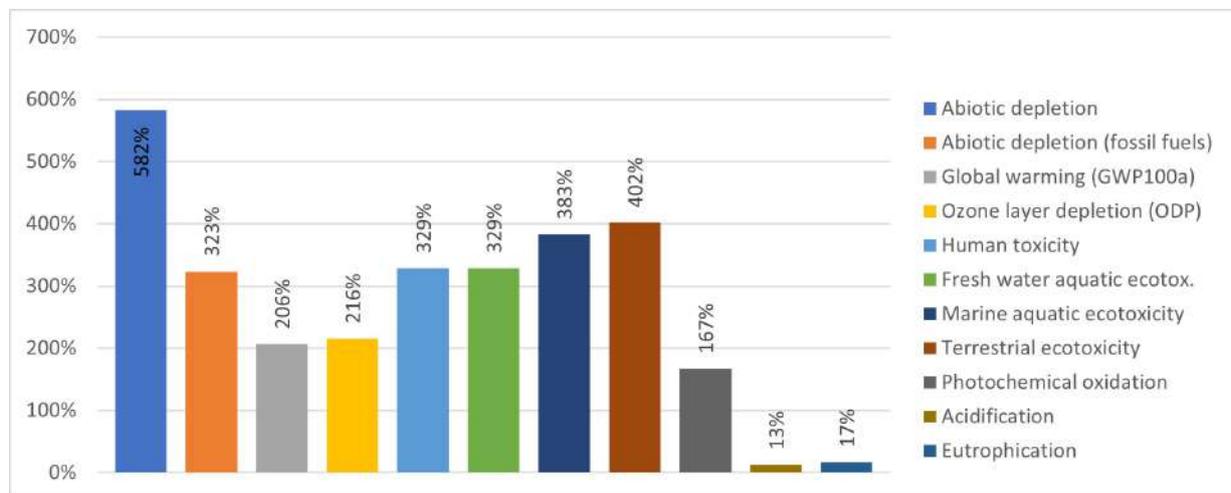


Figura E.14: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado R

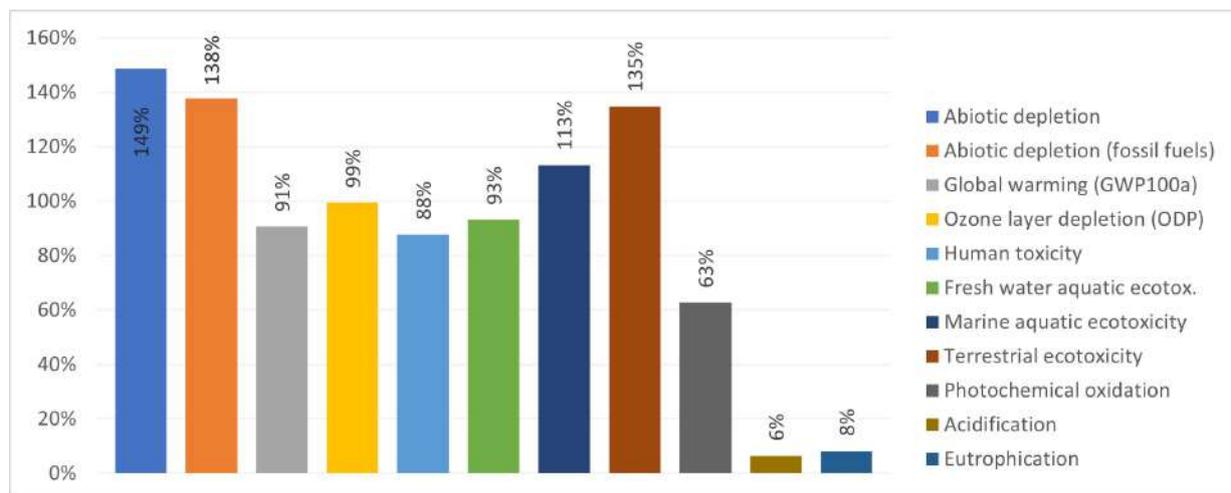


Figura E.15: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado S

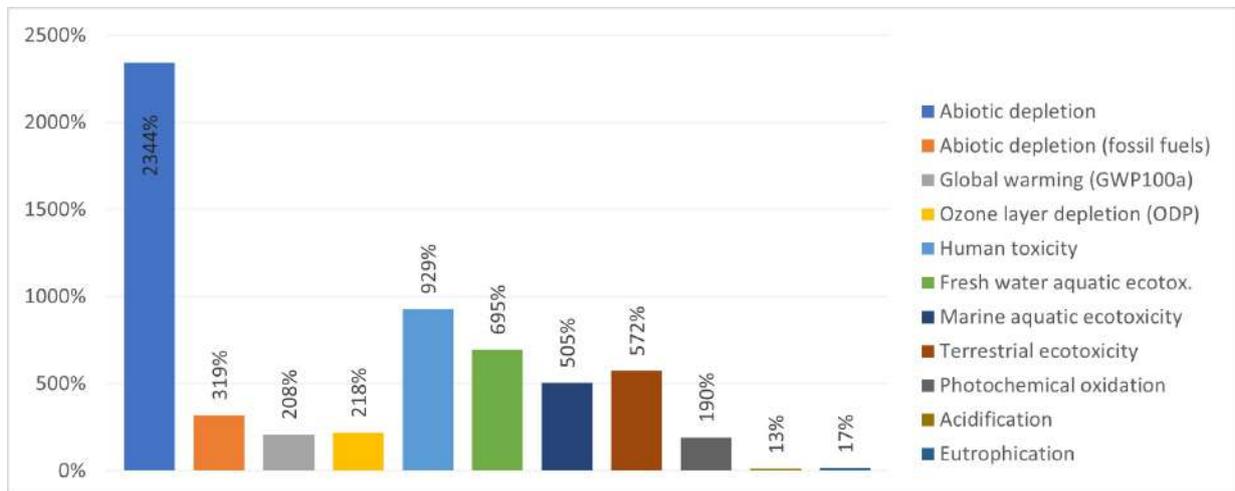


Figura E.16: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado T

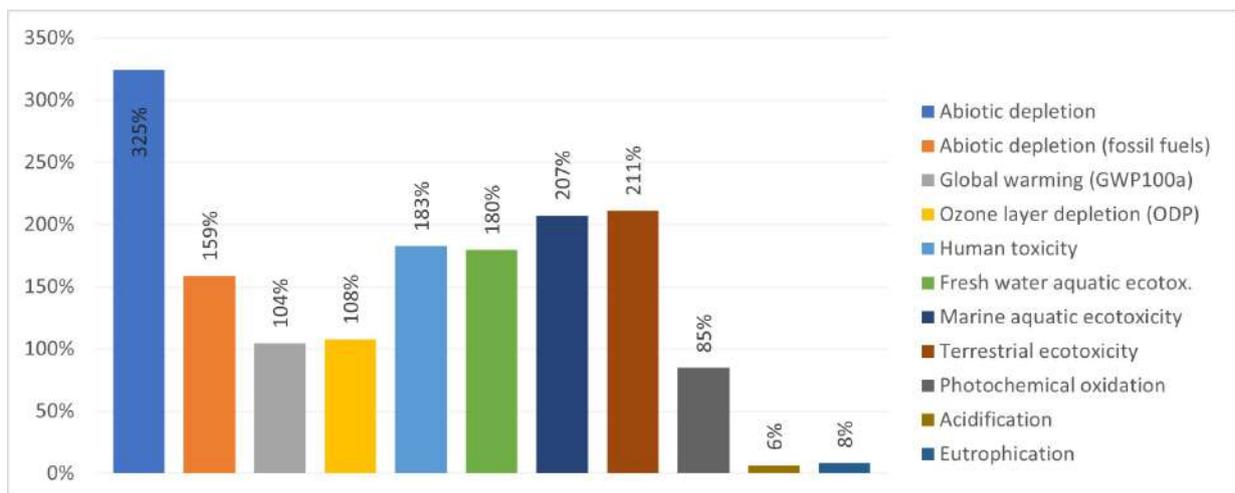


Figura E.17: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado U

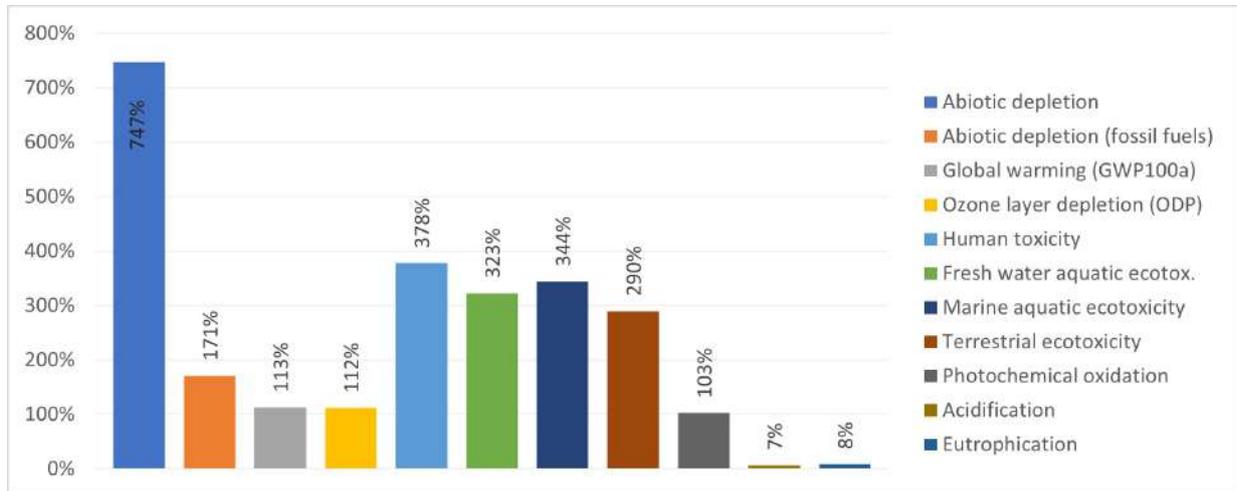


Figura E.18: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado V

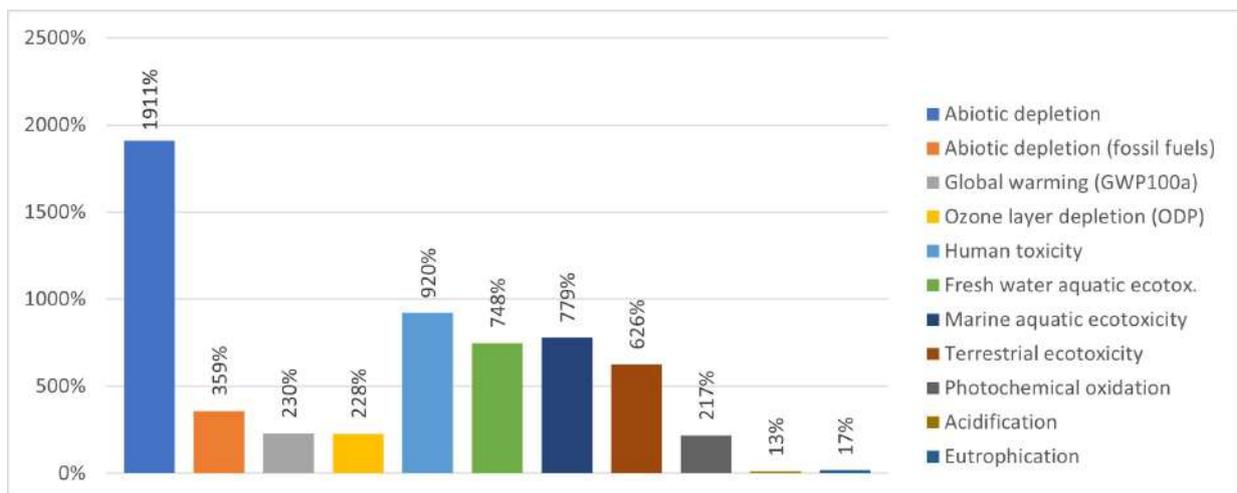


Figura E.19: Comparación de resultados de fertilizante inorgánico vs biofertilizante para el mercado W