

## Capítulo 8

### 8. Conclusiones y futuras líneas de investigación

Dentro del análisis del ciclo de vida (ACV) los elementos de la normalización y la valoración son muy controversiales porque presentan limitaciones relacionadas con la incertidumbre de los datos utilizados y la subjetividad inherente a las elecciones basadas en juicios de valor. Sin embargo se trata de dos pasos que facilitan la interpretación y la incorporación de aspectos medioambientales en la toma de decisiones, por lo cual se requiere mejorarlos a través de métodos que fortalezcan su valor científico.

El ACV tiene un gran potencial para fundamentar la toma de decisiones, particularmente en sistemas complejos como es el caso de la gestión de residuos, pero los problemas asociados con la normalización y la valoración han limitado ese potencial debido a la dificultad de interpretación de los resultados. Actualmente la cantidad de trabajos publicados de ACV de gestión de residuos es muy amplia, sin embargo en la mayoría de ellos no se abordan los pasos de la normalización y la valoración.

Con el propósito de fortalecer los elementos de la normalización y la valoración, y tomando en cuenta que en los ACV de gestión de residuos existe una carencia en la aplicación de métodos de normalización y valoración, en esta tesis se establecieron los siguientes objetivos:

1. Desarrollar un método de normalización y de valoración para el análisis del ciclo de vida a partir de la lógica difusa y las metodologías de valoración de ciclo de vidas existentes. Se busca que el elemento de dicho método considere explícitamente los objetivos ambientales, los inventarios de emisiones y uso de recursos de una región determinada, así como las preferencias de los tomadores de decisiones.
2. Realizar un análisis de ciclo de vida para la gestión integral de residuos municipales en la Región de Cataluña, dando cumplimiento a todos los elementos que forman parte de la herramienta ACV, con la finalidad de aplicar el método de normalización y valoración desarrollado y probar su funcionalidad.

Se puede afirmar que los objetivos anteriores fueron satisfechos, ya que:

- Se analizaron las metodologías de normalización y de valoración de ACV existentes.
- Se analizaron las metodologías de apoyo a la toma de decisiones, específicamente las teorías de valor multiatributo (MAVT), las cuales consideran criterios múltiples para la toma de decisiones.
- Se analizaron las metodologías para la toma de decisiones en ambientes difusos.
- Se desarrolló una metodología para la normalización y valoración en ACV, basada en la lógica difusa.
- Se generaron factores de normalización para Cataluña a partir de inventarios regionales.
- Se estimaron los objetivos ambientales para Cataluña, así como los umbrales sostenibles para las categorías de impacto seleccionadas.
- Se definieron los objetivos y el alcance para el ACV de la gestión de residuos municipales de Cataluña, y se plantearon escenarios de gestión alternativos.
- Se realizó un inventario de ciclo de vida (ICV) para el sistema de gestión de residuos de Cataluña y para los escenarios de gestión alternativos.
- Se realizó la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) para la gestión de residuos en Cataluña y para los escenarios de gestión propuestos.
- Se normalizaron y valoraron los resultados caracterizados de la EICV mediante la metodología de normalización y valoración propuesta.

Aunque en cada capítulo se presenta un análisis detallado de los resultados y sus conclusiones, a continuación se resaltan los aspectos más relevantes que representan las principales contribuciones de esta tesis.

### **8.1. Propuesta metodológica difusa para la normalización y la valoración en ACV**

El uso de la metodología de valoración Distance to Target (DtT), modificado de acuerdo al marco de las Teorías de Valor Multi-Atributo (MAVT), proporciona un soporte teórico en el proceso de la valoración porque incorpora la realidad de cada región al considerar las emisiones totales generadas en una región determinada, los objetivos ambientales regionales y el umbral de sostenibilidad. Sin embargo, presenta limitaciones relacionadas con la imprecisión de la información.

Estas limitaciones pueden ser tratadas mediante el modelo general de toma de decisiones multiatributo difuso, que es una herramienta capaz de evaluar sistemas complejos que coexisten en el campo de la subjetividad y la imprecisión, lo cual permite aprovechar la fortaleza teórica del valor obtenido mediante DtT modificado por MAVT.

La propuesta metodológica difusa que se presenta es una herramienta adecuada para apoyar el proceso de toma de decisiones a partir de los resultados de la caracterización de la EICV, ya que hace posible la realización de la normalización y la valoración de una forma matemáticamente robusta y considerando la incertidumbre de los datos.

## **8.2. ACV de la gestión de residuos municipales ordinarios en Cataluña**

La realización del inventario de ciclo de vida (ICV), requiere de la búsqueda constante de información que no siempre está accesible y en esos casos se realizaron estimaciones tomando como base instalaciones de gestión de residuos que no forman parte del sistema estudiado. Mucha de esta información proviene de Reino Unido en donde se han realizado ICV que se encuentran publicados. Aún así se identificaron carencias de datos lo cual señala la necesidad de seguir investigando en esta área.

Los procesos de recolección de residuos conjunto contribuyen al impacto en todas categorías analizadas debido al uso de los combustibles fósiles, pero de ellos la recolección en puntos verdes es el proceso que más efectos genera.

La fabricación de compost genera impactos no significativos, en ocho de las nueve categorías analizadas, por las emisiones generadas durante el proceso y el consumo de energía eléctrica.

La metanización es un proceso que evita los impactos en todas las categorías debido a la generación de energía eléctrica, aunque no llega a ser relevante al compararlo con los flujos totales del sistema.

La incineración contribuye en las categorías de eutrofización y toxicidad terrestre, pero evita el daño en acidificación, disminución de ozono estratosférico, cambio climático, formación de foto-oxidantes, efectos carcinogénicos, efectos respiratorios y uso de combustibles fósiles. Estos resultados son producto de los beneficios de generar energía eléctrica en el proceso.

Los procesos de reciclaje evitan los impactos en todas las categorías analizadas dado que ahorran emisiones al sustituir materias primas vírgenes por materiales recuperados.

El vertedero controlado tradicional evita el impacto de forma poco significativa en acidificación, toxicidad terrestre, efectos respiratorios y uso de combustibles fósiles; genera impactos poco relevantes en eutrofización y por sus altísimas emisiones, es el principal contribuyente en las categorías de disminución de ozono estratosférico, cambio climático, formación de foto-oxidantes y efectos carcinogénicos.

Por otra parte, el vertedero de balas plastificadas genera contribuciones no significativas en todas las categorías de impacto, por lo tanto se podría suponer que se trata de una tecnología de disposición más eficiente en términos ambientales, pero esta situación puede ser cierta mientras que la cubierta de polietileno de la bala mantenga sus propiedades. En cualquier caso, este tipo de vertido debe considerarse en desarrollo y que requiere de estudios que permitan evaluar los impactos a el largo plazo.

De acuerdo a los resultados obtenidos se sugiere la siguiente jerarquía de tratamientos:

1. Reciclaje de materiales
2. Metanización
3. Incineración
4. Fabricación de compost
5. Vertido en balas plastificadas
6. Vertido controlado

Los escenarios analizados presenta un mejor desempeño conforme se aumentan los procesos de reciclaje y se disminuye el vertido.

### **8.3. Estimación de los valores de referencia para la valoración de ACV en Cataluña**

La obtención de valores de referencia para Cataluña, para las categorías de impacto analizadas presenta las siguientes desventajas:

No existen inventarios de emisiones para todas las categorías analizadas.

Para las categorías de impacto que si existen inventarios, éstos consideran períodos diferentes. No en todas las categorías de impacto se cuenta con objetivos ambientales definidos.

Cuando existen objetivos ambientales su fecha de cumplimiento es diferente entre categorías. Aunque en algunas categorías hay objetivos de emisiones definidos para España, no se cuenta con metas específicas para Cataluña.

Los umbrales de sostenibilidad no son fáciles de determinar, por lo que en algunas ocasiones se consideraron como cero de una forma arbitraria.

A pesar de las limitaciones identificadas el uso de valores de referencia para la normalización, su uso representa la ventaja de poner los resultados de la EICV dentro de un contexto real.

#### **8.4. Normalización y valoración difusa de los resultados del ACV de gestión de residuos municipales**

La jerarquía de desempeño obtenida es consistente con las características de cada escenario analizado y concuerda con los resultados de otros trabajos publicados que plantean escenarios parecidos. En ella se observa que los procesos de reciclaje son los mitigadores de daño mas importantes y el vertedero es el proceso que mas impactos genera, aunque hay importantes diferencias entre en vertedero controlado tradicional y el vertedero de balas plastificadas, ya que éste ultimo no presenta afectaciones significativas en ninguna de las categorías consideradas.

El método de valoración propuesto tiene la ventaja de incorporar datos de referencia para la región de Cataluña y situar los resultados de la EICV en un contexto real, lo cual no sucede cuando se utilizan métodos de valoración que incorporan pesos genéricos.

Otra ventaja de la metodología propuesta es que se propone un algoritmo que se puede aplicar a cualquier región, siempre y cuando se obtengan los datos de referencia para el área de estudio.

En esta metodología no se requiere el cuestionamiento a expertos para la obtención de pesos, lo es una ventaja porque la elicitación de pesos es un procedimiento largo en el cual se logra una limitada participación y cuyos resultados no son concluyentes, ya que se presenta mucha variación entre las respuestas obtenidas.

La metodología propuesta permite la normalización y la valoración en la EICV desde un enfoque matemáticamente robusto puesto que es una técnica que considera la incertidumbre inherente a los valores de referencia y a los datos utilizados para la realización del inventario, mediante el uso de la escala semántica y los niveles de pertenencia.

A pesar de las ventajas señaladas es necesario aplicar este método a otras situaciones para buscar probar su eficiencia y funcionalidad.

### **8.5. Futuras líneas de investigación y trabajos complementarios**

A partir de los resultados de esta tesis se pueden desarrollar los siguientes trabajos complementarios:

- Aplicación de la metodología propuesta a los resultados caracterizados de otros ACV para probar su funcionalidad.
- Comparación de la metodología propuesta con otros enfoques difusos que puedan ser apropiados para la valoración.
- Comparación de los impactos ambientales generados por los tipos de recolección usados en Cataluña.

Las líneas de investigación que pueden derivarse de esta disertación son las siguientes:

1. Obtención de datos de referencia para la valoración en Cataluña
  - Ampliar el inventario de emisiones de Cataluña de tal forma que se genere una base de datos fiable que refleje las emisiones de todas las actividades de la sociedad a partir de la cual se pueda obtener las referencias para la normalización necesarias en la metodología propuesta.
  - Determinar con una base científica los objetivos ambientales para Cataluña a partir de los compromisos de España o de las metas determinadas a nivel internacional para diferentes categorías de impacto.
  - Desarrollar y aplicar una metodología que permita identificar umbrales de sostenibilidad para diferentes categorías de impacto para la región de Cataluña.

2. Análisis del ciclo de vida de gestión de residuos

- Desarrollar nuevos enfoques para la consideración del marco de tiempo en el caso de vertederos
- Experimentación y análisis de la tecnología de vertido con balas plastificadas. Se requiere de simulaciones a largo plazo que permitan dilucidar la duración del empaque plástico y el comportamiento posterior de los materiales, con énfasis la fracción no fermentables con largos períodos de vida media.

