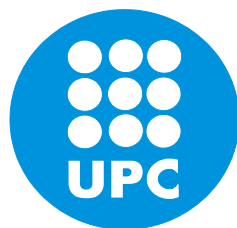


UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA
PROGRAMA DE DOCTORADO DE INGENIERÍA AMBIENTAL



DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA VALORACIÓN EN
EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA APLICADA A LA GESTIÓN
INTEGRAL DE RESIDUOS MUNICIPALES.

TESIS DOCTORAL

LEONOR PATRICIA GÜERECÀ HERNÁNDEZ

DIRECTOR: DR. SANTIAGO GASSÓ DOMINGO

BARCELONA, NOVIEMBRE DEL 2006

A
Constanza Eleonor
y Carlos Enrique

INDICE

Índice de Tablas.....	IX
Índice de Figuras	XIII
Resumen.....	XV
Abstract	XVII
Agradecimientos.....	XIX
Publicaciones.....	XXI

Capítulo 1

Introducción.....	1
1.1 Análisis del Ciclo de Vida (ACV).....	1
1.2 La incertidumbre y la subjetividad en el ACV	7
1.3 La lógica difusa.....	9
1.4 La gestión de residuos municipales.....	13
1.5 El Análisis del Ciclo de Vida de la Gestión Integrada de Residuos.....	17
1.6 Antecedentes.....	18
1.7 Justificación.....	25
1.8 Objetivos.....	26
1.9 Estructura del documento	27
1.10 Bibliografía.....	29

Capítulo 2

Normalización y valoración en ACV	37
2.1 Normalización.....	37
2.2 Métodos de valoración.....	40
2.3 Métodos de valoración en ACV	44
2.4 El sistema de referencia.....	49
2.5 Requerimientos de congruencia entre la valoración y la normalización.....	50
2.6 Conclusiones.....	51
2.7 Bibliografía.....	52

Capítulo 3

Herramientas para la toma de decisiones en ACV	57
3.1 La toma de decisiones en el contexto del ACV	57

3.2	Fundamentos del análisis de decisiones	58
3.3	Métodos para el Análisis de Decisiones Multi-Atributo (MADA)	61
3.4	La aplicación de los métodos MADA en la valoración.....	65
3.5	La MAVT en la normalización y la valoración	66
3.6	El Análisis de Decisiones Multi-Atributo difuso	68
3.7	La lógica difusa como una herramienta de decisiones en ACV	73
3.8	Conclusiones	75
3.9	Bibliografía	76
Capítulo 4		
Desarrollo de una metodología de normalización y valoración.....		81
4.1	Introducción.....	81
4.2	Propuesta metodológica	82
4.3	Discusión.....	86
4.4	Conclusiones.....	88
4.5	Bibliografía.....	89
Capítulo 5		
ACV de la gestión integral de residuos municipales.....		91
5.1	Definición de objetivos y alcance	91
5.2	Análisis del inventario.....	101
5.3	Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida	124
5.4	Interpretación de la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.....	150
5.5	Bibliografía.....	153
Capítulo 6		
Valores de referencia para la valoración		161
6.1	Introducción.....	161
6.1	Acidificación.....	162
6.3	Disminución de ozono estratosférico	162
6.4	Eutrofización.....	163
6.5	Cambio climático.....	164
6.6	Formación de foto-oxidantes.....	164
6.7	Toxicidad terrestre.....	165
6.8	Efectos carcinogénicos.....	167
6.9	Efectos respiratorios.....	167
6.10	Extracción de combustibles fósiles.....	168

6.11	Conclusiones.....	169
6.12	Bibliografía.....	170

Capítulo 7

Normalización y valoración difusa para en ACV de la gestión de residuos.....		173
7.1	Introducción.....	173
7.2	Obtención del indicador parcial de impacto	173
7.3	Ajuste del indicador parcial de impacto	175
7.4	Tratamiento difuso del indicador parcial.....	176
7.5	Factores de ponderación para las categorías de impacto.....	178
7.6	Obtención del vector de decisión.....	178
7.7	Resultados y discusión.....	179
7.8	Conclusiones.....	183
7.9	Bibliografía.....	184

Capítulo 8

Conclusiones y futuras líneas de investigación.....		187
8.1	Propuesta metodológica difusa para la normalización y la valoración en ACV.....	188
8.2	ACV de la gestión de residuos municipales ordinarios en Cataluña.....	189
8.3	Estimación de valores de referencia para la valoración de ACV en Cataluña.....	190
8.4	Normalización y valoración del ACV de gestión de residuos municipales.....	191
8.5	Futuras líneas de investigación y trabajos complementarios.....	192

Anexos

Publicaciones a que ha dado origen esta tesis		195
I	Güereca L.P., Gassó S., Baldasano J.M., Jiménez-Guerrero P. 2006. Life cycle assessment of two biowaste management systems for Balcelona Spain. Resources, Conservation and Recycling 49: 32-48.	
II	Güereca L.P., Agell N., Gassó S., Baldasano J.M. Fuzzy Approach to Life Cycle Impact Assessment: An Application for Biowaste Management Systems. Artículo aceptado en el International Journal of Life Cycle Assessment.	
III	Güereca L.P., Gassó S., Agell N., Baldasano J.M. 2005. Methodological proposal for the valuation in LCA. En Castells F., Rieradevall J. (eds). LCM2005 International Conference. September 5-7, 2005. Barcelona Spain.	

- IV Güereca L.P., Gassó S. y Baldasano J.M. 2005. A methodological proposal for the valuation in LCA applied to the biowaste management in Barcelona. En Grant T., James K. (eds). Fourth Australian Life Cycle Assessment Conference. 23-25 February Sydney Australia.

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	Cronología del desarrollo del Análisis del Ciclo de Vida.....	2
Tabla 1.2.	Cronología del desarrollo de la lógica difusa.....	10
Tabla 1.3.	Cronología de la gestión de los residuos sólidos municipales.....	14
Tabla 2.1.	Puntos de vista y métodos de normalización.....	39
Tabla 3.1.	Principales métodos para resolver problemas MADA borrosos.....	70
Tabla 5.1	Procesos que integran el Sistema de GIRMO 2004	93
Tabla 5.2.	Principales materiales reciclados en Cataluña a partir los residuos municipales ordinarios.....	96
Tabla 5.3	Descripción de los escenarios analizados	98
Tabla 5.4	Consumo de combustible por recogida selectiva.....	101
Tabla 5.5	Características de la recogida selectiva	103
Tabla 5.6	Parámetros considerados en la estimación de consumo de combustible transporte de residuos a puntos verdes	106
Tabla 5.7	Parámetros asumidos para estimar combustible gastado por transporte de PV a reciclaje y selección	106
Tabla 5.8	Porcentaje de materiales clasificados en plantas de selección general.....	108
Tabla 5.9	Parámetros asumidos para estimar combustible gastado por transporte entre plantas de selección, de reciclaje, de fabricación de compost, incineradoras y vertederos	108
Tabla 5.10	Porcentaje de materiales clasificados en plantas de selección de envases ligeros	109
Tabla 5.11	Parámetros asumidos para estimar combustible gastado por transporte de las plantas de selección de envases a las plantas de reciclaje y vertederos	110
Tabla 5.12	Parámetros asumidos para estimar combustible gastado por transporte de las plantas de transferencia a las incineradoras y vertederos	111
Tabla 5.13	Parámetros asumidos para estimar combustible gastado por transporte de impropios desde las plantas de selección a vertederos y de compost de rechazo a vertedero	113
Tabla 5.14	Valores de emisión por tonelada tratada en metanización.....	114
Tabla 5.15	Parámetros asumidos para estimar el combustible gastado por transporte de compost de rechazo a vertederos	114
Tabla 5.16	Origen y características de los materiales inorgánicos recuperados para su reciclaje	115

Tabla 5.17	Consumos de energía eléctrica y productos obtenidos en el reciclaje.....	116
Tabla 5.18	Parámetros estimados para estimar combustible gastado por transporte de impropios a vertederos	116
Tabla 5.19	Composición de los residuos que entran a incineración.....	117
Tabla 5.20	Factores de emisión por materiales incinerados	117
Tabla 5.21	Parámetros asumidos para estimar combustible gastado por transporte de incineración a vertedero de residuos especiales	118
Tabla 5.22	Valores que se asumen para la estimación de descargas de contaminantes en lixiviados	119
Tabla 5.23	Origen de los RMO depositados en vertederos controlados durante 2004 ..	120
Tabla 5.24	Composición de los lixiviados en vertedero	122
Tabla 5.25	Composición de biogás producido en vertederos	123
Tabla 5.26	Emisiones por motores generadores de energía eléctrica	124
Tabla 5.27	Emisiones al aire por tratamiento de biogás mediante antorcha	124
Tabla 5.28	Categorías de impacto consideradas en ACV de gestión de residuos	125
Tabla 5.29	Categorías de impacto consideradas en el EICV	125
Tabla 6.1	Categorías de impacto consideradas y su área de influencia.....	161
Tabla 6.2	Estimación de los valores de referencia para acidificación.....	162
Tabla 6.3	Estimación de los valores de referencia para la disminución de ozono estratosférico.....	163
Tabla 6.4	Estimación de los valores de referencia para la eutrofización.....	163
Tabla 6.5	Estimación de los valores de referencia para cambio climático.....	164
Tabla 6.6	Estimación de los valores de referencia para formación de foto-oxidantes.....	165
Tabla 6.7	Estimación de los valores de referencia para toxicidad terrestre.....	166
Tabla 6.8	Estimación de los valores de referencia para efectos carcinogénicos.....	167
Tabla 6.9	Estimación de los valores de referencia para efectos respiratorios.....	168
Tabla 6.10	Estimación de los valores de referencia para extracción de combustibles fósiles	169
Tabla 7.1	Resultados caracterizados de la EICV por escenario y categoría de impacto analizada.....	174
Tabla 7.2	Valores de referencia para Cataluña por categoría de impacto analizada ...	174
Tabla 7.3	Indicador de Impacto por categorías de impacto y alternativas [IPi(a)] ...	175
Tabla 7.4	Indicador parcial de impacto ajustado.....	175
Tabla 7.5	Nivel de pertenencia obtenido por los escenarios	176
Tabla 7.6	Valores difusos del y nivel de pertenencia para la etiqueta lingüística “Pésimo”	178

Tabla 7.7	Vector de decisión.....	179
Tabla 7.8	Resultados de la valoración de escenarios mediante diferentes métodos....	182
Tabla 7.9	Comparación de órdenes de preferencia obtenidos por diferentes métodos de valoración.....	183

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Fases de un análisis de ciclo de vida	3
Figura 1.2.	Elementos del impacto ambiental del ciclo de vida	5
Figura 1.3.	Cadena causa-efecto	6
Figura 1.5.	Representación gráfica de la función de pertenencia del conjunto "números mayores que 5"	11
Figura 1.6.	Gráfica de las funciones de pertenencia para la lógica difusa y la lógica clásica	12
Figura 1.7.	Esquema de un sistema integrado de gestión de residuos	15
Figura 1.8.	Diferencias entre ACV para productos y ACV para gestión de residuos ...	17
Figura 3.1.	Ciclo del proceso de decisión	61
Figura 3.2.	Relaciones entre el análisis de decisiones multi-criterio (MCDA), el análisis de decisiones multi-atributo (MADA), la optimización multi-objetivos (MOO) y los métodos mas usados en ACV.....	62
Figura 4.1.	Escala semántica usada para difuminar los Indicadores Parciales normalizados	85
Figura 5.1	Diagrama que ilustra el flujo de materia a través de la GIRMO.....	94
Figura 5.2	Contribuciones a la categoría de acidificación.....	137
Figura 5.3	Contribuciones a la categoría de ozono estratosférico.....	139
Figura 5.4	Contribuciones a la categoría de eutrofización.....	140
Figura 5.5	Contribuciones a la categoría de cambio climático.....	142
Figura 5.6	Contribuciones a la categoría de formación de foto-oxidantes.....	143
Figura 5.7	Contribuciones a la categoría de toxicidad terrestre.....	145
Figura 5.8	Contribuciones a la categoría de efectos carcinogénicos.....	147
Figura 5.9	Contribuciones a la categoría de efectos respiratorios.....	148
Figura 5.10	Contribuciones a la categoría de uso de combustibles fósiles.....	149

Resumen

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica que determina los potenciales impactos ambientales asociados con un producto o servicio, desde la extracción de la materia prima hasta su disposición final y consta de las siguientes etapas:

- Definición del objetivo y alcance
- Análisis del inventario del ciclo de vida
- Evaluación del impacto del ciclo de vida
- Interpretación del ciclo de vida

En el Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV), se recopila un inventario de las entradas y salidas del sistema analizado pero con el inconveniente de que muchos de los datos utilizados son imprecisos porque provienen de estimaciones y consideraciones asumidas por el realizador del ACV.

Posteriormente, en la etapa de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) se determina la importancia relativa de cada elemento del inventario y se agregan las intervenciones en un conjunto de indicadores a los que llamamos categorías de impacto, pero las comparaciones y la toma de decisiones a partir de estos resultados no es fácil.

Dentro de la EICV existe el paso de la valoración, que consiste en asignar una importancia relativa a cada una de las categorías de impacto para después sumarlas y obtener un único índice ambiental global, lo cual facilita las comparaciones entre sistemas de productos o servicios y el proceso de toma de decisiones, sin embargo, es un paso muy controvertido porque implica la consideración de elementos ideológicos y juicios de valor.

En esta tesis se desarrolla un nuevo método de valoración que combina el método de valoración de Distancia al Objetivo (DtT) con las Teorías de Valor Multi-Atributo (MAVT) y la Teoría de la Lógica Difusa en un proceso que permite la consideración y el tratamiento de la incertidumbre de los datos y la subjetividad.

El primer paso de esta metodología es la obtención de un indicador parcial del impacto ambiental, calculado a partir de los resultados caracterizados del Análisis del Impacto del Ciclo de Vida (AICV) y considerando las emisiones totales de la región de referencia, así como las metas políticas y los umbrales de sostenibilidad. Posteriormente, el indicador parcial

obtenido se transforma para obtener un descriptor lingüístico borroso, el cual permite la construcción de un orden de preferencias entre el conjunto de alternativas planteadas.

Otro de los objetivos de esta disertación es la evaluación de los potenciales impactos ambientales asociados al sistema de manejo de residuos municipales en Cataluña y el análisis de ocho escenarios alternativos establecidos con base en los objetivos de gestión de residuos de Cataluña.

Los resultados sugieren la siguiente jerarquía de tratamientos: 1) Reciclaje de materiales, 2) Metanización, 3) Incineración, 4) Fabricación de compost, 5) Vertido en balas plastificadas y 6) Vertedero controlado.

Posteriormente, el método de normalización y valoración propuesto se aplica a los resultados del AICV obtenidos y se identifica que la mejor alternativa de gestión de residuos es la que incluye mas cantidad de materiales reciclados, mas tratamientos biológicos, mas incineración y menos vertido.

Se puede concluir que el orden de preferencias obtenido es consistente con las características de cada uno de los escenarios analizados y que el método propuesto permite la valoración de sistemas complejos que coexisten en el campo de la subjetividad y de la incertidumbre, facilitando con ello el proceso de toma de decisiones, basado en los resultados del AICV.

Abstract

The Life Cycle Assessment (LCA) is a methodological tool, which determines the potential environmental impacts associated with a product or service, since the raw materials extraction until the final disposition. Their steps are the next:

- Goal definition and scope
- Life cycle inventory analysis
- Life cycle impact assessment
- Life cycle interpretation

In Life Cycle Inventory Analysis (LCI), input and output data are processed to produce an inventory of environmental interventions, but many data are uncertain because came from estimations made by the LCA practitioner,

Next, in the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) step the relative importance of each environmental intervention is determined and grouped in a set of indicators named impact categories, however the comparisons between systems and the making decision process is difficult.

In LCA, the valuation step is very controversial, since it involves ideological elements and value judgments. However, it is very useful because it supports the decision-making process and facilitates the comparisons.

In order to strengthen the valuation step, in this thesis it is established a new method, which includes normalization and weighting. The methodological proposal involves the valuation method of Distance to Target (DtT) with the Multi-Attribute Value Theory (MAVT) and the Fuzzy Sets Theory. The result is a process which facilitates the consideration and the treatment of uncertainty and subjectivity.

The first step of the valuation methodology proposed consists of the acquisition of a partial environmental impact indicator, calculated on the basis of the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) results, an emissions inventory of the studied region, as well as the political targets and sustainability thresholds for a given area. Next, the partial indicator obtained is transformed to obtain a fuzzy linguistic descriptor, which permits the construction of a preference order amongst a series of alternatives.

Another objective of this dissertation is the assessment of the potential environmental impacts associated with the municipal waste management in Catalonia and the analysis of eight waste management scenarios based on their waste management plan.

The results suggest the next waste treatments order: 1) Materials recycling, 2) Biogasification, 3) Incineration, 4) Composting, 5) Landfilling by baling-wrapping technology, 6) Sanitary landfill.

Next, the normalization and valuation proposed method it is applied to the LCIA results and the better waste management option identified is the scenario with more recycling, more biological treatments, more incineration and less landfilling.

It is possible to conclude that the order of preferences obtained is consistent with the characteristics of each one of the analyzed scenarios and that the proposal method permits the evaluation of complex systems, which are frequently placed in the field of subjectivity and uncertainty. This is therefore a good method of supporting the decision-making process, based on life cycle impact assessment results.

Agradecimientos

Al Dr. Santiago Gassó por su invaluable apoyo, dirección y motivación a lo largo del período de estudios y particularmente en el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. José María Baldasano por la información y contactos facilitados para la obtención de datos, por sus atinados comentarios y sobretodo por su interés en esta investigación.

A la Dra. Núria Agell por todas las horas de asesoría en la aplicación de la lógica difusa.

A la Dra. Assumpció Antón por su gran ayuda al explicarme el uso del software TEAM.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios.

A mi esposo, Carlos Antonio, por su cariño, paciencia y compañía en todos los momentos.

A mis hijos, Carlos Enrique y Constanza Eleonor por haber sido considerados, independientes y responsables, permitiendo con ello la escritura de esta tesis.

Publicaciones

Güereca L.P., Gassó S., Baldasano J.M., Jiménez-Guerrero P. 2006. Life cycle assessment of two biowaste management systems for Balcelona Spain. *Resources, Conservation and Recycling* 49: 32-48.

Güereca L.P., Agell N., Gassó S., Baldasano J.M., 2006. Fuzzy Approach to Life Cycle Impact Assessment: An Application for Biowaste Management Systems. Artículo aceptado en el *International Journal of Life Cycle Assessment*.

Dante, R.C., Güereca, L.P., Neri, L., Escamilla, J.L., Aquino, L. and Celis, J., 2002. Life cycle analysis of hydrogen fuel: a methodology for a strategic approach of decision making. *International Journal of Hydrogen Energy* 27(2): 131-133.

Proceedings

Caballero C.A., Gasso S., Baldasano J.M., Güereca L.P. 2006. Una propuesta de indicadores genéricos para la evaluación ambiental estratégica. *Memorias del X Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*. 13-15 Septiembre. Valencia, España.

Güereca L.P., Gassó S., Agell N., Baldasano J.M. 2005. Methodological proposal for the valuation in LCA. En Castells F., Rieradevall J. (eds). *LCM2005 International Conference*. September 5-7, 2005. Barcelona Spain.

Güereca L.P., Gassó S. y Baldasano J.M. 2005. A methodological proposal for the valuation in LCA applied to the biowaste management in Barcelona. En Grant T., James K. (eds). *Fourth Australian Life Cycle Assessment Conference*. 23-25 February Sydney Australia.

García D., Caballero C., Güereca L.P., Rodríguez Ricardo. 2003. Evaluación del nivel equivalente de ruido con el software MITHRA. *Memorias del VII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*. Octubre del 2003. Pamplona, España. Universidad Pública de Navarra. ISBN. 84-9769-037-0

Güereca, L.P., Dante, R.C., Caballero, C., Andrade J. and Neri, L., 2002. "Security Risk Assessment for a Fuel Cell", *Euro-Sustain 2002, Conference Final Programme & Book of Abstracts*, 2-5 April 2002, Rhodes, Greece.

Güereca L.P., Dante R.C., Caballero C.A. and Neri L., 2002. “Environmental impact assessment of a wastewater treatment plant in a university through life cycle analysis”, Euro-Sustain 2002, Conference Final Programme & Book of Abstracts, 2-5 April 2002, Rhodes, Greece.

Dante, R.C., Güereca, L.P., Neri, L., Escamilla, J.L., Aquino L. and Celis J., 2001. “Life Cycle Analysis of Hydrogen Fuel: a Methodology for a strategic Approach of Decision Making”, Proceedings of the International Symposium HYPOTHESIS IV, 9-14 September 2001, Stralsund, Germany.

Güereca L.P., Dante R.C., Neri L. and Caballero C.A., 2001. “Analysis of feasibility of a wastewater treatment plant through the LCA and development of software”. Proc. 11th Annual meeting of SETAC Europe. 6-10 May 2001. Madrid Spain.

Dante, R.C., Güereca, L.P., Neri, L. and Escamilla, J.L., 2000. “ Análisis del Ciclo de Vida del Combustible Hidrógeno: algunos ejemplos”, Proceedings of the II National Congress of the Mexican Society of Hydrogen, 7-8 December 2000, Cuernavaca, Morelos, Mexico.