APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMO HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN A PROPUESTAS DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN CHILE.

Aplication of Life Cycle Assessment Like Evaluation Tool To Urban Solid Waste Management Proposal in Chile.

Juan Pablo Ayala[1]
Knud Henrik Hansen[2]

Dirección de contacto: Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Av. España 1680. Fono: (56-32) 265 4258. Mail contacto: henrik.hansen@usm.cl

Abstract
The Life Cycle Assessment is a tool that has been used for the evaluation of complex Municipal Solid Waste (MSW) management systems. This study applies this instrument for different MSW management in the municipality of Olmué, Region of Valparaiso, Chile, to determine the better option in environmental terms.

Five scenarios were considered, where different technologies were integrated technology like recycling, composting, anaerobic digestion, incineration and landfill. WAMPS, a software developed by IVL, was used for developing the Inventory Analysis and Environmental Impact Life Cycle. The environmental impact categories analyzed were acidification, eutrophication, global warming and photo-oxidant formation.

Results showed that the scenarios with recycling and incineration technologies had higher net profit in the different environmental impact categories. Biological treatment showed a modest benefit compared to the other technologies, but contributed to the reduction of waste to the landfill, which was the worst option, increasing environmental impacts in all the scenarios in which it was present.

These result with more information on the technical and economic feasibility and social acceptance of proposals will give a more comprehensive and holistic evaluation of the advantages and disadvantages of each option.

KeyWords: Urban Solid Waste Management, Life Cycle Assessment, Life Cycle Assessment Software, Urban Solid Waste Management Technologies.

[1] Universidad Técnica Federico Santa María. Sus principales intereses son los residuos sólidos urbanos y soluciones a escala local. Últimamente se ha especializado en análisis de ciclos de vida.

[2] Universidad Técnica Federico Santa María. Sus áreas de interés son la contaminación ambiental, remediación de suelos, tratamiento de riles con metales pesados, caracterización de cenizas volantes y termodinámica aplicada.

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMO HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN A PROPUESTAS DE SISTEMAS DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN CHILE.

Resumen
El Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta que ha sido utilizada para la evaluación de complejos Sistemas de Gestión de RSU (Residuos Sólidos Urbanos). En este estudio se propone la aplicación de este instrumento para propuestas de manejo de los RSU en la comuna de Olmué, Región de Valparaíso, Chile, para determinar las mejore opciones en términos ambientales.
Se consideraron 5 escenarios donde se integraban en distintas proporciones las tecnologías de reciclaje, compostaje, digestión anaerobia, incineración y relleno sanitario. Se utilizó el programa WAMPS desarrollado por el IVL para el desarrollo del Análisis de Inventario e Impacto Ambiental del Ciclo de Vida. Las categorías de impacto ambiental analizados fueron acidificación, eutrofización, cambio climático y formación de foto-oxidantes.
Los resultados arrojaron que los escenarios que contaban con las tecnologías de reciclaje e incineración mostraban un beneficio neto mayor en las distintas categorías de impacto ambiental. Los tratamientos biológicos mostraban un beneficio moderado comparado con las otras tecnologías, pero que aportaban a la disminución de residuos al relleno sanitario, que resultó ser la peor opción, empeorando los impactos ambientales en todos los escenarios en que estaba presente.
Estos resultados, más información sobre la factibilidad técnica-económica y la aceptación social de las propuestas, darán una idea más global y holística tanto de las ventajas y desventajas de cada opción.

Palabras Claves: Gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Software basados en ACV, Tratamientos de RSU

Introducción

Debido al poco desarrollo de Sistemas de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en Chile hay un gran potencial de implementación de diversas tecnologías que mejoren su manejo. Determinar que combinación de éstas es la más adecuada se vuelve complicado debido a la gran cantidad de variables a considerar, entre las que se cuenta con cada vez mayor importancia la dimensión ambiental.
El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) consiste en tomar todo el Ciclo de Vida (obtención recursos naturales, producción, transporte, consumo y disposición final) de un producto o servicio y entregar los impactos ambientales de cada etapa cuantitativamente en forma de emisiones. Se ha aplicado esta técnica para apoyar en la decisión de cuál sistema de gestión de RSU es el óptimo en comunidades de EE.UU y Europa.
Es por esto que en el marco del proyecto "Mapa Tecnológico de los Residuos Sólidos Domiciliarios" financiado por CORFO, y llevado a cabo por el CEARS (Centro de Economía y Administración de Residuos Sólidos) y el Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la UTFSM (Universidad Técnica Federico Santa María) se realiza un ACV a escenarios de gestión de residuos sólidos domiciliarios para determinar sus beneficios y/o impactos ambientales.

Objetivos

El objetivo principal de éste estudio es evaluar a través de la herramienta del Análisis de Ciclo de Vida distintos escenarios de sistema de gestión de RSU para comunas características de la realidad chilena y determinar las mejores opciones en términos ambientales.

Metodología empleada

El análisis de ciclo de vida es una herramienta discutida, probada y consensuada por lo menos desde hace 20 años, a tal punto que sus procedimientos están normalizados en las ISO 14040-14043. Las etapas típicas de un análisis de ciclo de vida y seguidas en este estudio son las siguientes:

1. **Definición de objetivos y alcances:** planteo de objetivos claros, límites del sistema a analizar, los tipos de impactos ambientales a considerar y la unidad funcional o de producción con que se relacionarán los impactos ambientales. En este caso particular se definió la comuna de Olmué, Región de Valparaíso, como unidad geográfica. Esta comuna es una de las que tiene mayor variabilidad de su población en la época estival, lo que la hace interesante de analizar. La unidad funcional será el total de residuos en toneladas generados por la comuna en un año. Las categorías de impacto ambiental a medir serán: calentamiento global, formación de foto-oxidantes, acidificación y eutrofización.
2. **Definición de escenarios:** los escenarios representan la combinación de opciones para las distintas etapas de un sistema de gestión de residuo sólidos: almacenamiento temporal, recolección, transferencia, transporte de largas distancias, revalorización, tratamientos y disposición final. Los escenarios escogidos son los siguientes:
   2.1. Actual: considera la operación en las condiciones actuales con recolección no segregada o sin separación en la fuente, y transporte directo de los mismos camiones a un relleno sanitario.
   2.2. Recolección segregada para Reciclaje, Compostaje y Relleno Sanitario (Rec+Comp): esta es un propuesta que considera segregación de los residuos en origen en tres grupos: residuos de alimentos y jardín para su posterior tratamiento con compostaje, otra fracción de reciclables (papel, cartón, metales, plástico PET y vidrios) que se destina a una Instalación de Recuperación de Materiales (IRM) y una última fracción de los residuos que no caben en ninguna de las fracciones antes denominadas (que se denominará "Fracción Residual") y que se destina a Relleno Sanitario.
   2.3. Recolección segregada para Reciclaje, Digestión Anaerobia y Relleno Sanitario (Rec+DA): considera las mismas características del escenario anterior, sólo que la fracción de residuos de alimentos y jardín se dirige a una planta de biodigestión.
   2.4. Recolección segregada para Reciclaje, Compostaje, Incineración y Relleno Sanitario (Rec+Comp+Inc): considera las mismas características que el punto 2.2, pero la fracción residual se destinará a Incineración.
   2.5. Incineración (Inc): es otra propuesta de escenario que considera las mismas condiciones del escenario Actual, pero en donde la totalidad de los residuos se destine a incineración.

   La recolección en los distintos escenarios considera los mismos circuitos que se hacen en la actualidad, sólo cambiando su frecuencia: en el escenario Actual y de Incineración la frecuencia es de 2 veces a la semana, en cambio en el resto que involucra segregación en origen sería de 3 veces a la semana (una por cada fracción a la semana). La justificación para mantener los mismos circuitos y la recolección puerta a puerta es pensando en facilitar la adaptación de los vecinos a los nuevos sistema, reconociendo que el factor de participación de la sociedad es fundamental en el éxito de nuevos sistemas de gestión de RSU.
   Para el reciclaje se asume que la IRM estará en la misma comuna, a no más de 11 kilómetros. Llegará toda la fracción reciclable junta y se separará en forma manual. Se recuperará el vidrio, plásticos PET, metales, papel y cartón. También se asume que las industrias recuperadoras donde se destinara los residuos reciclables estarán ubicadas en Santiago, dado que la mayoría de este tipo de instalaciones se encuentra en esta región, a que se lograría un mejor precio de venta y a la relativa cercanía de la comuna de Olmué a esta ciudad (aproximadamente 150 km.). Para el reciclaje se expandirá el sistema para considerar las emisiones evitadas por la extracción de las materias primas y la energía para producir la misma cantidad de productos que se generan a partir del reciclaje.
   Para el compostaje se utiliza la técnica en pilas abiertas. El 100% del compost generado se utilizará como fertilizante. La otra alternativa para el tratamiento de los restos de comida y jardín, la digestión anaerobia, dará como producto biogás que se utilizará para la generación de energía eléctrica, uso en automóviles y generación de calor, ocupándose un 90%, 10% y 10% del biogás generado para cada uso respectivamente. Tanto en el compostaje como en la digestión anaerobia se plantea que se lleven a cabo en la misma comuna, a no más de 11 kilómetros de su punto central. En el caso del compostaje, se tendrá en cuenta las emisiones evitadas al

reemplazar los fertilizantes fósiles. En el caso de la digestión anaerobia, se considerará el beneficio ambiental de reemplazar fuentes energéticas más contaminantes como el carbón.
Las condiciones de las planta de incineración modelada cumple con las exigencias de la Unión Europea. Cuenta con las tecnologías de abatimiento para el material particulado, dioxinas y furanos. Los residuos generados en el proceso (escoria y cenizas) son dispuestos en rellenos de seguridad respectivamente. Se considerará el beneficio ambiental de reemplazar fuentes energéticas más contaminantes como el carbón.
El relleno sanitario cuenta con la tecnología necesaria para el control de los gases y lixiviados. El biogás gas es recuperado y utilizado para la producción de energía eléctrica y aprovechamiento de las pérdidas de calor. En la actualidad, el relleno sanitario utilizado por la comuna de Olmué para la disposición final de sus RSU es Loma Los Colorados, ubicado en Til Til, en la región Metropolitana, ubicado a unos 80 km de Olmué. Se toma como suposición que la supuesta planta de incineración utilizada en su respectivo escenario se encuentra a la misma distancia que el actual relleno sanitario. Se considerará como beneficio ambiental el reemplazo de fuentes energéticas más contaminantes como el carbón por la energía eléctrica y calor generados por la quema del biogás.

3. **Análisis de Inventario:** recolección de los datos necesarios para calcular los impactos ambientales, cálculo de las cargas ambientales normalizándolas a la unidad funcional de referencia elegida y elaboración de un inventario de emisiones. Los datos necesarios para llevar a cabo esta etapa es la caracterización de los residuos generados en la comuna elegida y datos operativos como circuitos de recolección, distancia a centros de disposición final, etc.
4. **Evaluación del impacto:** clasificación de los impactos en distintas categorías según su naturaleza y caracterización para cuantificarlas en una unidad común. En este caso el impacto de la acidificación se cuantifica en toneladas de SO2 equivalente [ton SO2-eqv], el de la eutrofización en toneladas de O2 equivalente [ton O2-eqv], el del cambio climático en toneladas de CO2 equivalente [ton CO2-eqv], y el de la formación de foto-oxidantes en toneladas de C2H4 equivalente [ton C2H4-eqv].

Actividades o etapas desarrolladas

1. Definición de Objetivos y alcances.
2. Recolección de Datos: principalmente los datos necesarios se obtuvieron desde proyectos anteriores o la misma Municipalidad.
3. Elección de software: existen una serie de software que permiten llevar a cabo las etapas de análisis de inventario y evaluación del impacto específicamente para el caso de sistemas de gestión de RSU. Su principal desventaja es que sus modelos no son lo suficientemente flexibles para poder graficar la realidad latinoamericana. Caso similar pasa con las bases de datos que ocupan. Para este caso, se eligió el programa WAMPS desarrollado por el IVL (Instituto Sueco para la Investigación Ambiental por sus siglas en sueco), dado que permite ciertos grados de flexibilidad y cuenta con una experiencia anterior de uso en un caso chileno (Stenmarck *et al*, 2010).
4. Análisis de Inventario y Evaluación del impacto del ciclo de vida a través del programa WAMPS.
5. Interpretación de los resultados y conclusiones.

Resultados Obtenidos

Los resultados de la Evaluación del Impacto Ambiental del ciclo de vida se detallan en la Tabla 1 y se grafican en la Figura 1. Los resultados positivos indican un impacto ambiental neto para el respectivo escenario, y a su vez los valores negativos indican un beneficio ambiental neto, o en otras palabras, los impactos evitados por el respectivo escenario.
Se puede observar una clara ventaja en términos ambientales de los escenarios que cuentan con la alternativa de Incineración. Uno de los puntos que explica esta situación es que el Relleno Sanitario, a pesar de controlar los lixiviados y el biogás, presentan los más altos impactos ambientales en todos los escenarios en que está presente para cada impacto ambiental considerado. Por otro lado, la incineración tiene la ventaja de que sus impactos ambientales son compensados ya que reemplaza otras fuentes energéticas más contaminantes, como el carbón.

El reciclaje tiene una contribución positiva en todos los escenarios que está presente, especialmente en la eutrofización, donde evita 164.021, 20 [ton 02-eqv].

Tabla 1.- Detalle resultado Análisis de Impacto Ambiental del Ciclo de Vida en las 4 categorías para los 5 escenarios

Categoría	Unidad	Escenarios				
		Actual	Inc	Rec+Comp	Rec+Comp +Inc	Rec+DA
Acidificación	Ton SO2-eqv	50,998	-8,373	43,210	-11,611	40,196
Eutrofización	Ton O2-eqv	481,091	-29,536	-163610,280	-164054,820	-163636,865
Calentamiento Global	Ton CO2-eqv	5458,700	-2939,949	3574,719	-5623,255	3466,004
Formación Fotooxidantes	Ton C2H4-eqv	3,969	-0,104	2,806	-0,283	2,842

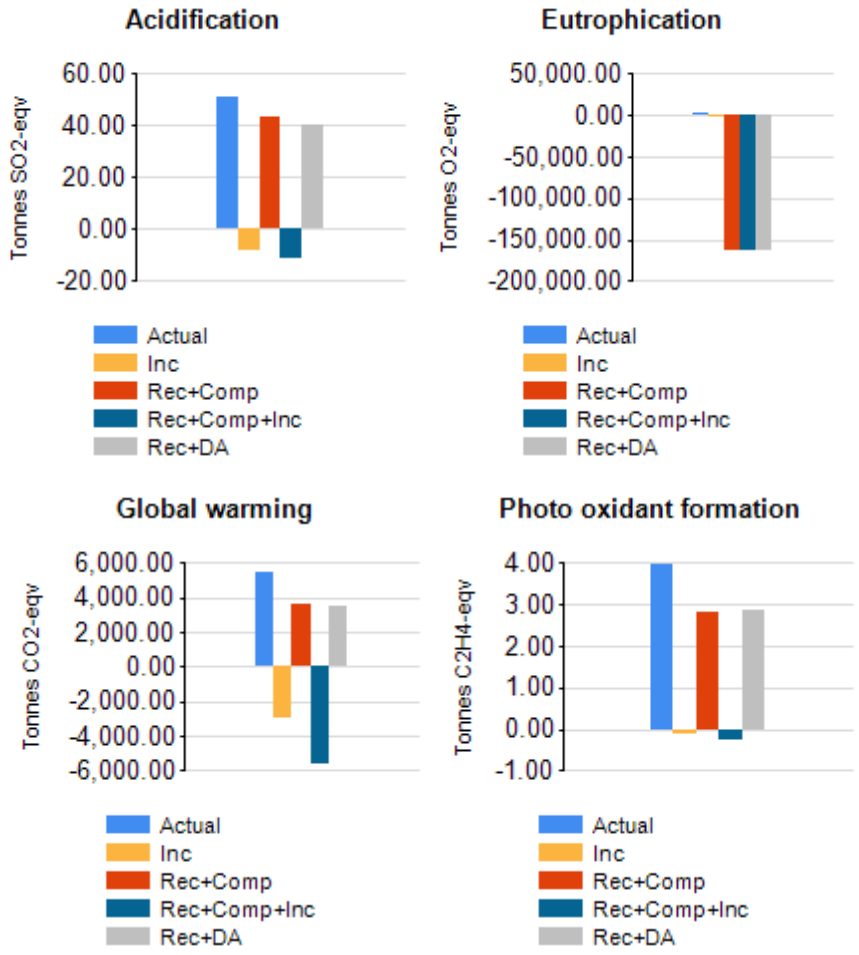

Figura 1.- Resultado Análisis de Impacto Ambiental del Ciclo de Vida en las 4 categorías para los 5 escenarios

Los tratamientos biológicos tienen impactos y beneficios ambientales más bien moderados con respecto a tecnologías como la incineración y el reciclaje. El compostaje tiene su mayor impacto ambiental en Cambio Climático con 68,95 [ton C02-eqv], y su mayor beneficio ambiental en la formación de fotooxidantes reduciendo en 0,002 [ton C2H4-eqv]. Para el caso de la Digestión Anaerobia, su mayor impacto ambiental lo tiene en la categoría de eutrofización con 0,94 [ton 02-eqv], y el mayor beneficio en cambio Climático con una reducción de 31,95 [ton C02-eqv].
Los impactos de la recolección son menores con respecto a las tecnologías de revalorización y tratamiento.

Conclusiones y Recomendaciones

Para el caso de la comuna de Olmué se confirma que el relleno sanitario es la peor opción, tal cual lo indica la jerarquización del tratamiento de RSU. Por otro lado, el reciclaje y la incineración muestran grandes beneficios ambientales: el primero al evitar la producción desde materias primas vírgenes y el segundo al reemplazar fuentes energéticas más contaminantes. Esto no quita que cada actividad tenga su impacto ambiental. Los tratamientos biológicos como compostaje y la digestión anaerobia no muestran grandes beneficios ambientales como la incineración y el reciclaje, pero si reducen el impacto ambiental en los escenarios en que están presentes al desviar grandes cantidades de residuos a la peor opción, que es el relleno sanitario.
Estos datos son importantes para tener claro las implicancias de la elección de un escenario u otro en la dimensión ambiental. Por supuesto, se necesitan más datos técnicos, económicos y sociales para determinar cuál es la mejor opción. Por ejemplo, hay que determinar qué tan factible es la instalación de una planta incineradora para una comuna como Olmué de un poco más de 16 mil habitantes, si es necesario unirse con otras comunas, etc. Por otro lado, se tiene que tomar en cuenta la dimensión social, que la comunidad beneficiada/afectada se sienta comprometida con los cambios para así asegurar un nivel de participación alto que asegure el éxito de las medidas.
Con respecto a la metodología, sería interesante para próximas investigaciones poder comparar con otros programas de ACV más flexibles en el desarrollo del modelo, base de datos y factores de emisión, para que se acerque aún más a la realidad de los sistemas de gestión de residuos sólidos en países como Chile.

Agradecimientos. *– Al Centro de Economía y Administración de Residuos Sólidos CEARS, es especial a Martina Reinke.*

Referencias

Baumann, Henrikke; Tillman, Anne-Marie. The Hitch Hiker's Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application. Sweden, Studentlitteartur, 2004.

Boer, J. den; Boer, E. den; Jager, J. LCA IWM: A decisión support tool for sustainability assessment of waste management systems. Waste Management, **27**, 1032-1045, 2007.

Stenmarck, Asa; Oddou, Martine; Sundqvist, Jan-Olov. Using LCA-tool WAMPS in waste management planning. IVL Swedish Environmental Research Institute.

Tchobanoglous, George; Kreith, Frank. Handbook of Solid waste Management. 2° Edición. McGraw-Hill, 2002.