



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S. C.

POSGRADO

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA EL PROCESO
DE PRODUCCIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE
HIDRÓXIDO DE MAGNESIO UTILIZADAS COMO
RETARDANTES DE FLAMA**

Tesis que como Requisito para obtener el Grado de maestría en ciencia y tecnología ambiental presenta:

Ing. Brenda Janeth Borunda Valverde

Director de tesis:

Dr. Guillermo González Sánchez.

Chihuahua, Chih., agosto 2012



i. Agradecimientos

A Dios por permitirme vivir esta experiencia, a mis hijos Esteban y Regina por ser el motor que impulsa mi vida y mi motivación para seguir adelante, a mi esposo Ramiro por siempre confiar en mí y apoyarme en las decisiones, por escucharme y alentarme a seguir adelante, a mi mamá la Sra. Rosa Emma Valverde, mi cuñada la Sra. Josefina Cepeda y demás familia por cuidar a mis hijos con amor y paciencia cuando tuve que estar ausente.

Con especial agradecimiento al personal de CADIS (Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable) en los nombres de la Dra. Mireya González Collín y el M.C. Juan Pablo Chargoy por su aporte a mi conocimiento del ACV y el software Simapro.

A mi asesor el Dr. Guillermo González Sánchez por ayudarme y guiarme en esta nueva rama que para mí era desconocida, a todo el personal de Peñoles por su apoyo en la recopilación de la información para el análisis, a mis compañeros de generación por esos momentos que vivimos juntos al volver a ser estudiantes.

Por último a la comunidad CIMAV por dejarme ser parte de ella.



ii. ÍNDICE

I.	Introducción.....	6
	1.1 Análisis de ciclo de vida aplicado a la minería.....	6
	1.2 Motivo del estudio	7
II.	Antecedentes	10
	2.1 Orígenes	10
	2.2 Puntos débiles: complejidad y subjetividad	11
	2.3 Etapas del ciclo de vida	13
	2.4 ISO 14000: normalización de herramientas ambientales.....	14
	2.5 El ACV en la minería.....	16
	2.6 ¿Qué son los retardantes de flama?.....	17
	2.7 Uso de material nanoestructurado.....	19
	2.8 Software Simapro.....	20
III.	Objetivo general.....	23
IV.	Objetivos específicos.....	23
V.	Hipótesis.....	24
VI.	Materiales y métodos.....	25
	6.1 Metodología propuesta por la ISO 14000.....	25
VII.	Resultados.....	29
	7.1 Objetivo del estudio.....	29
	7.2 Análisis de inventario de ciclo de vida.....	30
	7.2.1 Procedimiento de recolección de datos.....	30
	7.2.2 Descripción cualitativa y cuantitativa de los procesos.....	31
	7.3 Evaluación de impactos de ciclo de vida.....	34
	7.3.1 Discusión de resultados.....	36
	7.4 Interpretación.....	41
	7.4.1 Análisis de sensibilidad.....	42
VIII.	Conclusiones, limitaciones y recomendaciones.....	44
IX.	Referencias.....	46



iii. Resumen

En la actualidad legar a futuras generaciones un medio ambiente para la civilización actual y generaciones futuras ha sido una de las preocupaciones que hoy en día atañen a las empresas. Es por ello que se empiezan a enfocar en producciones sustentables.

Existen herramientas que nos ayudan a tener una producción sustentable, el análisis de ciclo de vida (ACV) una recopilación de entradas y salidas con la cual podemos determinar los impactos ambientales generados de un determinado proceso productivo. El ACV va de la cuna a la tumba es decir, desde la extracción de la materia prima hasta la disposición final o reutilización.

El presente trabajo de investigación fue hecho para la empresa SAPSA Peñoles en Torreón, Coah., y fue un ACV para el proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio, es decir, “de la cuna a la puerta” y no “de la cuna a la tumba”.

Se utilizó la metodología ISO 14000, como herramienta de software se usó el Simapro 7.3 en la modalidad classroom. Los métodos de evaluación de impactos fueron el CML por ser el más utilizado por la comunidad científica y nos da la huella de carbono y el ECO INDICADOR 99 H por ser más amigable y entendible para la empresa y dejar todo en unidades iguales (eco puntos). Además ambos métodos de evaluación de impactos cuentan con categorías de impacto similares por lo que fue satisfactorio el comparar los resultados de ambos métodos.

Los resultados obtenidos fueron que en la etapa de producción de síntesis fue la que mayor impacto ambiental provoca por su alto consumo de energía eléctrica, por lo que afecta en mayor medida al consumo de combustibles fósiles.



Se hizo un análisis de sensibilidad para determinar si el aumento de consumo de energía eléctrica hace que aumente el consumo de combustibles fósiles, el resultado fue un comportamiento exponencial.

Como conclusión, el proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio afecta al consumo de combustibles fósiles en mayor medida que en otra de sus etapas, esto a consecuencia del consumo de energía eléctrica.

Como recomendación se sugiere hacer más énfasis en los datos de inventario de consumo de energía eléctrica y determinar si toda esta energía proviene de la CFE o es que SAPSA Peñoles tiene alguna generación alterna de energía eléctrica.

El ACV tuvo una revisión crítica por una parte externa, como lo marca la norma, en el nombre de Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable (CADIS) y fue de manera satisfactoria.



I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, legar a las futuras generaciones un medio ambiente apto para la continuidad de la civilización se ha convertido en una de las principales preocupaciones de la humanidad. En el marco de la globalización de las economías no es posible estar al margen de esta preocupación. En estos días, los consumidores son más exigentes, tanto en la conservación de los recursos naturales y en la protección del medio ambiente, como en la calidad de los productos y servicios que reciben. Por tal motivo, la industria enfrenta el reto de producir con alta calidad y satisfacer las expectativas de los consumidores y de otras partes interesadas en el tema de la protección del medio ambiente.

El impacto ambiental de un producto inicia con la extracción de las materias primas y termina cuando la vida útil del producto finaliza, convirtiéndose en un residuo que ha de ser gestionado adecuadamente. Durante la fabricación, las empresas deben evaluar el impacto ambiental que tiene su proceso, además tienen la responsabilidad sobre el impacto que ocasionan las partes involucradas en el proceso hasta que el producto llega al cliente consumidor, (por ejemplo proveedores, distribuidores y consumidores). Esta cadena, que va 'desde el nacimiento hasta la tumba' es lo que se denomina **ciclo de vida de un producto**.

El análisis de ciclo de vida (ACV), en teoría, es un método analítico (Chacón, 2008) que contempla y hace una interpretación de los impactos ambientales potenciales de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida. El ACV es "la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema producto a través de su ciclo de vida" (NTC-ISO 14040). El análisis incluye entonces la extracción de materias primas, producción, transporte, distribución, uso, reciclaje y disposición final.

1.1 Análisis de ciclo de vida aplicado a la minería

La minería proporciona la mayor parte de las materias primas para uso industrial procesos y productos. La minería del carbón proporciona cerca de la mitad (48,5% en 2008) de la producción neta de electricidad en los EE.UU. (EE.UU. Administración de Información de Energía de 2008).

Los metales y minerales han sido parte esencial en el desarrollo económico e histórico de México, sobre todo por la riqueza de vetas de plata en el país. Es parte importante del desarrollo social y económico del país.



La industria minera se enfrenta a varios retos: disminuir las viejas prácticas de la minería, y en algunos casos, la tecnología obsoleta también. Es por ello el interés de utilizar prácticas que contribuyan al desarrollo sostenible.

En los últimos años, la evaluación del ciclo de vida ha sido una herramienta útil en la evaluación de impactos ambientales y la aplicación de estrategias ecológicas. (Suppen, 2006)

En el 2003 las regiones de América latina y el Caribe reconocieron la necesidad de usar estrategias de consumo y producción sostenibles, por lo que se identificó la evaluación del ciclo de vida como oportunidad para entrar en el mercado de productos ambientalmente amigables como estrategia clave en el ámbito de consumo y producción sostenible. (Suppen, 2006)

El ACV es una herramienta analítica utilizada para cuantificar los impactos en los procesos, productos y servicios. (ISO 14040).

1.2 Motivo del estudio

En el presente trabajo se estudiarán los posibles impactos ambientales mediante un análisis de ciclo de vida que pueda generar el proceso de producción de Hidróxido de Magnesio en partículas nano estructuradas, dicho estudio se está haciendo en la empresa llamada Química del Rey, Peñoles ya que pretende entrar al mercado europeo y para ello deben contar con un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de su proceso de producción.

Peñoles, fundado en 1887, es un grupo minero con operaciones integradas en la fundición y afinación de metales no ferrosos y en la elaboración de productos químicos. Peñoles es el mayor productor mundial de plata afinada, bismuto metálico y sulfato de sodio, líder latinoamericano en la producción de oro, plomo y zinc afinados.

En mayo de 2008, Química del Rey, Coahuila, comenzó operaciones una nueva planta para producir hidróxido de magnesio, con una capacidad de 15,000 toneladas anuales y en la que se invirtieron USD\$15.0 millones. Como resultado de lo anterior, se alcanzaron niveles de producción record de este producto.



El hidróxido de magnesio es utilizado como retardante de flama. La empresa española Draka Cables Industrial y la mexicana Peñoles desarrollaron un nuevo recubrimiento plástico que da a los cables eléctricos una mayor resistencia a altas temperaturas, por lo que en caso de un incendio el fuego no los consume.

Esta innovación, que ya se comercializa en España a través de la línea de cables Firex Protech Evolución y cuya venta se extenderá en unos meses al norte de Europa, permitió a estas firmas obtener el Premio Internacional "Luis Pieri" CYTED-IBEROEKA 2010.

Para desarrollar este nuevo recubrimiento, se introdujeron nanopartículas de hidróxido de magnesio en los espacios intermoleculares del polímero, con lo cual se modificaron sus propiedades estructurales y funcionales, las cuales son superiores a las de los materiales tradicionales que se emplean para fabricar cables eléctricos.

El material es notablemente menos inflamable y que en caso de un incendio el fuego no se propaga por los cable elaborados con este materia, sino que se extingue, lo que impide la liberación de gastos tóxicos.

Esta cualidad no sólo permite satisfacer eficazmente las normas de seguridad de las instalaciones eléctricas, sino que abre un nuevo estándar para la industria.

Otras ventajas de este polímero es que tiene una barrera de resistencia a la oxidación, por lo que los cables tienen una vida útil de 40 años, el doble de los tradicionales. Además este material se caracteriza por una mayor flexibilidad.

En la actualidad se utilizan cables con compuestos bromados los cuales si presentan importantes impactos ambientales. Los éter difenílico polibromados (PBDE) son compuestos bromados retardantes de llama muy empleados en la industria para prevenir incendios. Estos compuestos, que se bioacumulan en el ecosistema y en los humanos, pueden alterar el sistema endocrino de los seres vivos, con efectos negativos sobre las hormonas tiroideas, en el sistema reproductor y neuronal (Portal de ciencia y tecnología, 2009).

Como se mencionó anteriormente el presente estudio hará un análisis de ciclo de vida sobre los procesos de obtención de nanopartículas de hidróxido de



magnesio. Abarcará desde la extracción de materia prima hasta la producción de nanopartículas a partir de salmueras, con la información que recabemos en cuanto al proceso, nos podremos dar cuenta del impacto ambiental que representa etapa por etapa (de eso se trata el ACV) por medio de un inventario.



II. ANTECEDENTES

2.1 Orígenes

Los primeros estudios enfocados sobre algunas etapas del ciclo de vida de ciertos productos se remontan hacia fines de la década de los años 60 y principios de los 70. Esos estudios pusieron el énfasis en el análisis de la eficiencia, en el consumo de la energía y sus fuentes, el consumo de materias primas y, en menor medida, en la disposición final de los residuos generados.

En 1969 la Coca Cola estadounidense financió un estudio destinado a relacionar y comparar el consumo de recursos para fabricar los envases para sus bebidas con las emisiones asociadas a los procesos productivos correspondientes. Por la misma época, también en Europa se estaba estudiando una especie de inventario que más tarde se conoció como «Ecobalance». En 1972, en el Reino Unido, LAN BOUSTEAD, 1996 se dedicó a calcular la energía total que se requería para la fabricación de diversos tipos de envases (de vidrio, plástico, acero y aluminio) para bebidas.

Al principio, se consideró que el consumo de energía tenía mayor prioridad respecto de la generación de residuos, las descargas y emisiones hacia el medio ambiente, entre otras cosas quizás porque todavía no había tantas demandas por parte de la opinión pública para que las empresas tuvieran en cuenta la prevención del deterioro ambiental, y porque el precio de los combustibles energéticos había subido tan abruptamente como para justificar darle esa prioridad.

Recuérdese además, que por esa época se produjo la crisis del petróleo, la que afectó principalmente a los países no productores, y que se manifestó por restricciones en la provisión de energía eléctrica, entre otras limitaciones al consumo de energía procedente de combustibles fósiles. Luego de superada esa crisis hubo un decaimiento en la importancia asignada al problema energético.

TRAMA Y TROIANO, 2001

Cualquier producto, servicio o actividad tiene un impacto sobre el medio ambiente. La idea de la Evaluación del Ciclo de Vida (ECV) es inventariar y evaluar dichos impactos lo cual da como resultado un informe utilizado para tomar decisiones.



Una ventaja clara de la metodología es que permite detectar situaciones en las que un determinado sistema parece “más limpio” que otro simplemente porque transfiere las cargas ambientales a otros procesos o región geográfica, sin un mejoramiento real desde el punto de vista global (fenómeno conocido como “problem shifting”).

La definición de ACV provista por la SETAC (1993) es la siguiente:

“Es un procedimiento objetivo de evaluación de cargas energéticas y ambientales correspondientes a un proceso o a una actividad, que se efectúa identificando los materiales y la energía utilizada y los descartes liberados en el ambiente natural. La evaluación se realiza en el ciclo de vida completo del proceso o actividad, incluyendo la extracción y tratamiento de la materia prima, la fabricación, el transporte, la distribución, el uso, el reciclado, la reutilización y el despacho final”.

La familia de Normas ISO 14000 contempla el ACV en su serie 14040; la ISO 14040 elabora un tipo de norma (estableciendo un procedimiento común a todos) que sirva para evaluar los impactos medioambientales a lo largo de toda la vida de un producto.

2.2 Puntos débiles: complejidad y subjetividad

Complejidad

Su desarrollo como método de valoración está todavía en sus etapas iniciales y cargado de polémica:

- *El ACV es una herramienta que por su complejidad resulta en procesos que requieren tiempo y recursos materiales y humanos, muchas veces incompatibles con la capacidad actual de la industria de desarrollar este tipo de iniciativas.*
- *La información relativa a los inventarios de impactos ambientales en el ACV requiere un elevado nivel de información sobre materiales y procesos, que puede no estar disponible para un amplio espectro de situaciones.*



- *La aplicación del ACV en productos complejos, en los que los límites del sistema se extienden en una multiplicidad de actividades, puede resultar en grados de complejidad incompatibles con evaluaciones fiables del Ciclo de Vida. Es este el caso de la construcción en el que la complejidad es evidente.*
- *El ACV incide sobre una gran diversidad de variables que no poseen siempre el mismo sentido, es decir, puede darse el caso de que la mejor opción energética no sea la que genere menos residuos o emisiones. Además de este condicionante, hay que considerar cuestiones como la definición de escalas comunes de evaluación entre variables y situaciones distintas.*

GONÇALVES, 2004

Subjetividad

Uno de los puntos débiles de la metodología del ACV es la subjetividad de la que depende en algunos pasos del cálculo:

La metodología del ACV pretende objetividad y transparencia. En la fase del Inventario de Ciclo de Vida (ICV) los valores de cargas ambientales corresponden a un esfuerzo de objetivizar al máximo todo el conjunto de datos y parámetros utilizados. Dichos valores pueden variar en función de la exactitud de los datos y de su precisión. No ocurre así con la determinación de los impactos ambientales introducidos en el paso Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida. Tanto su identificación, su evaluación, como su ponderación respecto a otros impactos puede responder a criterios subjetivos.

La utilización de modelos para el cálculo de los impactos resulta a su vez una fuente de subjetividad. Un modelo es una representación simplificada de los fenómenos y mecanismos que se dan en la realidad. La elección de dónde y de qué simplificación introducir no deja de ser parcialmente subjetiva. Diferentes investigadores pueden desear usar diferentes modelos que corresponden a diferentes premisas y simplificaciones.

La naturaleza de las elecciones e hipótesis que se hacen en el ACV, el establecimiento de los límites del sistema, la selección de la fuente de datos, las categorías de impacto, pueden ser subjetivas (ISO 14040). Diferencias en los



datos de entrada pueden causar diferencias en el alcance, límites geográficos, etc. Estas diferencias pueden ser originadas por diferentes actitudes relacionadas con el concepto de naturaleza e intereses: sector industrial, movimiento ecologista, asociación de consumidores, gobierno...

ANTÓN VALLEJO, 2004

2.3 Etapas del ciclo de vida

Las etapas del ciclo de vida, según GONÇALVES (2004), son:

1. **Adquisición de materia prima:** etapa de actividades de acción directa sobre el medio natural. En este punto se incluye el material no renovable, el agua y la biomasa de recolección.
2. **Procesamiento de material a granel:** tratamiento de la materia prima (separación y purificación por ejemplo) para adecuar los materiales a transformaciones posteriores.
3. **Producción de materiales técnicos y de especialidad:** algunos autores combinan esta etapa con la anterior designándola «tratamiento de materiales».
4. **Fabricación y ensamble:** en esta etapa se acaban de producir los materiales de base y los materiales técnicos.
5. **Transporte y distribución:** con el actual sistema globalizado, esta etapa adquiere especial importancia dadas las grandes distancias que deben recorrer los productos para su comercialización en lugares distintos a donde se han producido. En muchos casos, los componentes necesarios para la fabricación del producto final también recorren importantes distancias.
6. **Uso y servicio:** en esta etapa se *contabiliza* el mantenimiento y las reparaciones que necesita el producto durante su uso por el consumidor (algunos productos no pueden usarse directamente, necesitan acciones, como por ejemplo los alimentos congelados). En esta fase también se considera la reutilización interna de materiales, por ejemplo la reutilización de botellas de cerveza en una casa.
7. **Retiro y tratamiento:** en este paso es clave la posibilidad de reutilización o reciclaje de los materiales (*valorización* del material), en algunos casos es



posible cerrar los ciclos de vida insertando el material retirado en un punto de la fabricación de un nuevo material.

8. **Disposición, destino final:** cuando el material no es *valorizado* termina su ciclo de vida. En este punto se valora la forma en que éste es depositado en el medio natural. En el depósito de un material se pueden tener en cuenta y controlar sus características físico-químicas por ejemplo y tomar medidas para evitar efectos negativos del material desechado sobre el entorno.



Figura 1. Etapas del ciclo de vida de un producto

2.4 ISO 14000: normalización de herramientas ambientales

ISO 14040 y ACV



En el conjunto de normas anterior, la ISO 14040 es la relativa al ACV. Dada su complejidad, esta normativa establece un protocolo al cual deberá ajustarse todo estudio de ACV. La ISO 14040 da la siguiente definición del ACV:

“El ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio.”

ISO 14040, 1997

Las categorías generales de impactos medioambientales que precisan consideración incluyen el uso de recursos, la salud humana y las consecuencias ecológicas (ISO, 1997).

Dentro de la normalización ISO se deben distinguir normativas e informes técnicos. A día de hoy se han elaborado cuatro normativas relacionadas con el ACV:

- **ISO 14040:** *Gestión medioambiental, ACV, Principios y estructura (1997). Especifica el marco general, principios y necesidades básicas para realizar un estudio de ACV, no describiéndose la técnica del ACV en detalle.*
- **ISO 14041:** *Gestión medioambiental, ACV, Definición del objetivo y alcance y el análisis del inventario del ciclo de vida (1998).*

En esta normativa se especifican las necesidades y procedimientos para elaborar la definición de los objetivos y alcance del estudio y para realizar, interpretar y elaborar el informe del análisis del ICV (LCI).

- **ISO 14042:** *Gestión medioambiental, ACV, Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida; Environmental management LCA-LCIA/Life Cycle Impact Assessment (2000).*

En ella se describe y establece una guía de la estructura general de la fase de Análisis del Impacto del Ciclo de Vida (AICV) (LCIA). Se especifican los



requerimientos para llevar a cabo un AICV y se relaciona con otras fases del ACV.

- **ISO 14043:** *Gestión medioambiental, ACV, Interpretación del ciclo de vida. Environmental management, LCA-LCI (2000).*

Esta normativa proporciona las recomendaciones para realizar la fase de interpretación de un ACV o los estudios de un ICV, en ella no se especifican metodologías determinadas para llevar a cabo esta fase.

ANTÓN VALLEJO, 2004

2.5 El ACV en la minería

En casi ninguna otra industria los temas de los recursos y la eficiencia energética son de gran importancia como en la industria minera y de metales (Awuah-Offei, 2011). La limitación de los recursos utilizados y la fuerza de la producción de energía intensiva obligan a las empresas a asumir una gran responsabilidad para actuar de manera más sostenible y reducir los impactos ambientales.

Además, los clientes en las industrias de trabajo de los metales tienen mayor demanda de prestaciones ecológicas. Teniendo en cuenta los ciclos de vida y teniendo la responsabilidad más allá de los productos individuales (gestión del producto) que son importantes motores de innovación en la industria.

La falta de ACV en la minería limita la capacidad para exigir mejoras importantes en la gestión de los proveedores o cambios en el proceso. Los estudios de ACV ayudan a aportar nuevos datos sobre las opciones tecnológicas en la minería, así como el impacto al medio ambiente y los beneficios de la extracción minera.

El ACV puede ofrecer una perspectiva única en el análisis y evaluación de una serie de cuestiones y opciones en la industria minera. El estudio de ACV, es el único que utiliza un método de determinación del alcance cuantitativo (Awuah-Offei et al. (2008). Al igual que en todos los inventarios de ciclo de vida (ICV), el ICV de la minería puede sacar sus datos de diversas fuentes incluyendo a la empresa, sitios web y datos públicos (Spitzley y Tolle 2004), estudios



detallados y la recopilación de datos en las minas (Durucan et al. 2006), y las estadísticas de toda la industria e informes de los gobiernos (Mangena y Brent 2006; Suppen et al. 2006).

2.6 ¿Qué son los retardantes de flama?

Los retardantes de flama, también llamados ignífugos, es un concepto que define a una diversidad de compuestos o mezclas de compuestos químicos incorporados en plásticos, textiles, circuitos electrónicos, etc. diseñados para reducir la inflamabilidad de un material o para demorar la propagación de las flamas a lo largo y a través de su superficie.

Estas propiedades han sido desarrolladas y aplicadas consecuentemente en las prácticas para prevenir incendios, y su uso es parte integral de las reglamentaciones correspondientes en todos los países donde éstas existen. Los retardantes de flama, en sus diversas modalidades, han sido utilizados ampliamente en la protección pasiva de madera y otros materiales de construcción, incluyendo estructuras metálicas; en muchos textiles y fibras sintéticas, y en una amplia variedad de aplicaciones de plásticos técnicos, principalmente en la industria electrónica.

En consecuencia, los retardantes de flama se encuentran distribuidos ampliamente en locales y edificios públicos, tales como oficinas y centros de trabajo, en teatros, cines, y otros centros recreativos, así como en aeropuertos, hoteles, hospitales, escuelas, etcétera. De igual forma, están presentes en el hogar en productos como las alfombras, ciertas telas para tapicería y cortinas, en recubrimientos, elementos de construcción y muebles de procedencia industrial, y en una multitud de aparatos electrodomésticos.

Los éteres bifenílicos polibromados, PBDE, y otros compuestos bromados se hallan entre los más efectivos y económicos retardantes de flama, especialmente aquellos que se emplean como aditivos en las formulaciones de plásticos. A mediados de los años 1990, los compuestos bromados representaban hasta 25% de la producción mundial de retardantes de flama, estimada en 600,000 toneladas anuales.



Los PBDE se utilizan mucho en circuitos electrónicos impresos y en corazas de plástico para computadoras, televisores y otros equipos electrónicos. También se encuentran en ropa y equipo de protección contra fuego, y en telas tratadas para diversos usos, en aparatos electrodomésticos y en máquinas de oficina, en interiores automotrices, en alfombras y en recubrimientos arquitectónicos. Se cree que los PBDE se liberan gradualmente al ambiente a lo largo del ciclo de vida de la mayoría de estos productos, pero el proceso aún no es bien conocido.

Los retardantes de flama fueron considerados durante mucho tiempo como altamente benéficos para los consumidores y el público en general dado que al reducir la inflamabilidad de muchos productos, han abatido la tasa de incendios y accidentes menores, y en los casos inevitables de siniestro, actúan reduciendo su agresividad, su velocidad de propagación y la producción de humos y gases de combustión, minimizando así los costos económicos y la pérdida de vidas.

Sin embargo, recientemente estos compuestos han recibido una atención diferente, ya que varias investigaciones han comenzado a advertir sus propiedades tóxicas. Si bien la evidencia científica es aún incompleta o difícil de interpretar, las organizaciones civiles y ambientalistas han comenzado a destacar el problema, y como contraparte, las autoridades reguladoras, las empresas fabricantes y las instituciones responsables de la protección civil, ambiental y del combate a incendios, están reconsiderando el uso de estos productos, avocándose a la búsqueda y desarrollo de alternativas ambientalmente seguras y sin riesgos para el consumidor.

En comparación con los bifenilos policlorados, BPC, es poco lo que se sabe de los efectos sobre la salud humana por exposición a los PBDE. Los primeros estudios sugieren que estos efectos pueden incluir cáncer, daño hepático y disfunciones de la glándula tiroides. Investigaciones recientes realizadas en ratones mostraron efectos adversos en neurodesarrollo, capacidad de aprendizaje, memoria y comportamiento. La estructura de algunos compuestos bromados se parece a la de ciertas hormonas, lo cual puede causar problemas reproductivos en la vida silvestre.

Los principales retardantes de flama contienen compuestos orgánicos BROMADOS como los bifenilos polibromados (PBB), los éteres bifenílicos polibromados (PBDE), el tetrabromobisfenol A (TBBPA) y el hexabromociclododecano (HBCD).



2.6.1 Nanopartículas de hidróxido de magnesio

Las nanopartículas de hidróxido de magnesio y plata que Peñoles produce, se utilizaron en la fabricación del recubrimiento de un nuevo cable de baja tensión, el cual fijó un nuevo estándar en el mercado, al mejorar sus propiedades térmicas, mecánicas y eléctricas, aportar mayor resistencia a agentes externos y disminuir el riesgo de flamabilidad. (INFORME Peñoles 2010).

En 2009 una empresa española introdujo al mercado un nuevo cable eléctrico de baja tensión, con retardante de flama en su recubrimiento, de excelente desempeño, flexibilidad y duración, fabricado con nanopartículas de hidróxido de magnesio y plata producidas por Peñoles. Este nuevo material modificó las propiedades estructurales y funcionales del cable eléctrico, al hacerlo superior a los tradicionales, además de ofrecer mejoras en las propiedades térmicas, mecánicas y eléctricas, mayor resistencia a los agentes externos, barrera contra gases combustibles y reducción importante del riesgo de flamabilidad, lo cual ha fijado un nuevo estándar en el mercado. (INFORME Peñoles, 2010).

Por lo anterior mencionado es que la empresa Peñoles requiere del análisis de ciclo de vida del proceso de producción y uso de nanopartículas de hidróxido de magnesio y así entrar al mercado europeo.

2.7 Uso de material nanoestructurado

En el 2009, A. L. Roes, et al, hizo un estudio cuyo objetivo fue reforzar los beneficios potenciales de matrices poliméricas con nanoobjetos y buscar sus aplicaciones tanto en las propiedades mecánicas y en los impactos ambientales. Para determinar las propiedades mecánicas, se aplicó el índice de materiales definidos por la rigidez y fuerza. Para el cálculo de los impactos ambientales, se aplicó la Metodología de Análisis del Ciclo de Vida, se centra en el uso de energía no renovable (UENR). Se ha demostrado que el UENR será un buen indicador para el medio ambiente. Estudiaron 23 nanocompuestos diferentes, basado en polímeros termoplásticos y matrices termoendurecidas y montmorillonita organófila, sílice, los nanotubos de carbono de pared simple (y de pared múltiple) y la carga de carbonato cálcico. Para 17 de estos se registró una disminución de la



funcionalidad basada en UENR. Se sacó la conclusión de que el uso de los nanoobjetos de relleno puede tener beneficios tanto del punto de vista ambiental y con respeto a las propiedades mecánicas.

Según un artículo de *avancetecnomateriales* del año 2010, la nanotecnología ha lanzado nuevos productos ambientales para prevenir la erosión y limpiar los lugares contaminados. Se puede proteger el suelo mediante un componente nanoestructurado que favorece la estabilización del mismo.

A pesar de que la nanotecnología tiene una gran cantidad de aplicaciones positivas para la humanidad, ésta en un futuro próximo podría presentar ciertos riesgos para en el ambiente. Por ejemplo, las nanopartículas podrían reaccionar con sustancias presentes en el medio o catalizar reacciones presentes en el medio. Incluso podrían llegar a ser tóxicas para los microorganismos del entorno, lo que podría dar pie a una bioacumulación de la toxicidad en la cadena trófica que llegaría magnificada a los seres humanos.

Otro aspecto importante a mencionar es que también se puede presentar un riesgo en los productos de consumo, el Instituto Gubernamental para la Salud y el Medio Ambiente de Holanda (RIVM) asegura que el mayor riesgo lo encierran las nanopartículas libres utilizadas en productos de limpieza, cosméticos y productos de cuidado personal, mientras los nanomateriales incorporados en aplicaciones, como en electrónica, equipos deportivos o recubrimientos presentan un menor riesgo.

En cualquier caso, la mayoría de expertos coincide en que aunque algunos nanomateriales puedan tener efectos negativos para el medio ambiente, ese mismo conocimiento puede servir para superar el problema. Por ejemplo, la propia nanotecnología podría servir para nuevos sistemas que analicen los efectos de estas nanopartículas, tanto las naturales como las artificiales.

2.8 Software Simapro

SimaPro es un programa desarrollado por la empresa holandesa PRé Consultants, que permite realizar Análisis de Ciclo de Vida (ACV), mediante el uso de bases de datos de inventario propias (creadas por el usuario) y bibliográficas (BUWAL, IDEMAT, ETH, IVAM).



SimaPro ofrece una herramienta profesional para almacenar, analizar y realizar un seguimiento del rendimiento ambiental de sus productos y/o servicios. Con esta herramienta se facilita el análisis y la representación gráfica de ciclos complejos de un modo sistemático y transparente.

A continuación se muestran unas pantallas en las cuales se hace referencia al modo en que se utiliza este software.

En la figura 2 se muestra la pantalla inicial, ahí nos da la opción de abrir un proyecto ya existente o crear uno nuevo

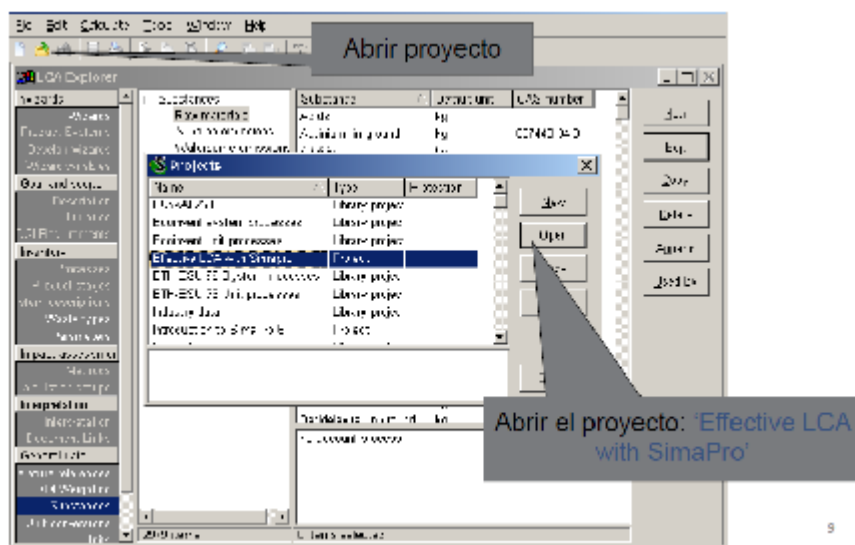


Figura 2. Pantalla inicial Simapro (curso Simapro 7.3,2012)

En la figura 3 nos muestra las diferentes bibliotecas o base de datos con las que cuenta Simapro y nos da la opción de checar la descripción de cada una de ellas y poder navegar y explorar el software.

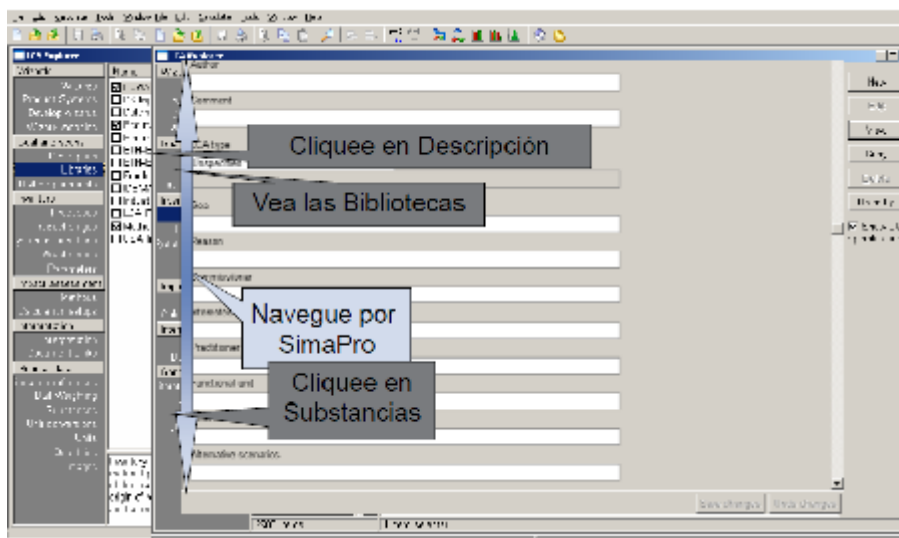


Figura 3. Bibliotecas disponibles en Simapro (curso Simapro, 2012)

Las bases de datos que se encuentran en Simapro son las que nos ayudan a determinar los impactos ambientales de un determinado proceso, es cuestión de seleccionar el proceso y agregar la cantidad que se consume en determinado proceso haciendo previamente un balance de masas y convirtiendo todo a la unidad funcional.

Básicamente lo que hace el software Simapro es clasificar las entradas y salidas en un algoritmo de cálculo con un método de evaluación de impactos, luego caracteriza midiendo así la agresividad de una sustancia con respecto a otra de referencia (factores de caracterización) y así dejar todo en una sola unidad y por último calcula el impacto generado con dicha entrada/salida.

En resumen: clasifica – caracteriza – calcula.



III. OBJETIVO GENERAL

Hacer el análisis de ciclo de vida para el proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio utilizado como retardante de flama y determinar el impacto ambiental que provoca dicho proceso.

IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- *Recabar información* sobre las diferentes etapas del proceso que se lleva a cabo para la producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio para su uso como retardante de flama.
- *Realizar* por lo menos dos visitas a la planta de Peñoles y Magnelec.
- *Analizar el inventario* con base en los consumos de agua, electricidad, combustibles, reactivos químicos y otros insumos que son consecuencia del proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio.
- *Analizar y entender* el funcionamiento del software tomando un curso del mismo.
- *Utilizar del software Simapro* para el manejo del inventario, para que nos dé cifras cuantitativas de los impactos ambientales.
- *Determinar el impacto ambiental* que provoca la producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio.
- *Interpretar los resultados.*



V. HIPÓTESIS

En el proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio la etapa que mayor impacto ambiental provoca es la síntesis por utilizar la mayor cantidad de energía eléctrica; por lo tanto la categoría de impacto ambiental que mas se afecta es la de agotamiento de combustibles fósiles.



VI. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio de ACV se hará para la empresa Peñoles para comparar el impacto ambiental generado durante de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio, utilizadas como retardantes de flama, esto por petición de la mencionada empresa ya que pretende entrar al mercado europeo.

El material que se utilizó fue un equipo de cómputo cargado con el software simparo 7.3 de la versión classroom.

6.1 Metodología propuesta por la ISO 14040

- *De acuerdo con la metodología propuesta por la normativa ISO 14040 un proyecto de ACV puede dividirse en cuatro fases: objetivos y alcance del estudio, análisis del inventario, análisis del impacto e interpretación.*

Tal y como ilustra la figura siguiente estas cuatro fases no son simplemente secuenciales. El ACV es una técnica iterativa que permite ir incrementando el nivel de detalle en sucesivas iteraciones.

ANTÓN VALLEJO, 2004



Figura 4. Esquema de las etapas del ACV, (Fuente: ISO 14040)



6.1.1 Objetivo y alcance del estudio

En esta fase se define el tema de estudio y se incluyen los motivos que llevan a realizarlo. Un objetivo podría ser por ejemplo comparar dos o más productos diferentes que cumplen las mismas funciones, para aplicar la información que se obtenga en la comercialización o en la reglamentación del uso de alguno de ellos. Otra meta podría ser determinar posibilidades concretas de introducir mejoras en el diseño de productos existentes, o en la innovación a través del diseño de nuevos productos, etc.

También en esta fase se establece la unidad funcional. La unidad funcional describe la función principal del sistema analizado. Un ACV no sirve para comparar productos entre sí, sino servicios y/o cantidades de producto que lleven a cabo la misma función. Por ejemplo, no es válido comparar dos kilos de pintura diferentes que no sirvan para realizar la misma función, cubrir un área equivalente con una duración similar.

En el caso de los sistemas agrícolas, por ejemplo, la principal función es la producción de alimentos (AUDSLEY, 1997). En estos casos, normalmente se considera como unidad funcional un kilo de producto fresco. La unidad funcional proporciona una referencia respecto a la cual las entradas y salidas del sistema pueden ser normalizadas en un sentido matemático.

Debido a su naturaleza global un ACV completo puede resultar extensísimo. Por esta razón se deberán establecer unos límites que deberán quedar perfectamente identificados. Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV. Varios factores determinan los límites del sistema, incluyendo la aplicación prevista del estudio, las hipótesis planteadas, los criterios de exclusión, los datos y limitaciones económicas y el destinatario previsto.

ANTÓN VALLEJO, 2004

6.1.2 Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

El segundo paso es recolectar y cuantificar las entradas y salidas de materia y energía correspondientes al *sistema producto* durante su ciclo de vida.



Esta fase comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para identificar y cuantificar todos los efectos ambientales adversos asociados a la unidad funcional. De una forma genérica denominaremos estos efectos ambientales como «carga ambiental». Ésta se define como la salida o entrada de materia o energía de un sistema causando un efecto ambiental negativo. Con esta definición se incluyen tanto las emisiones de gases contaminantes, como los efluentes de aguas, residuos sólidos, consumo de recursos naturales, ruidos, radiaciones, olores, etc. Cuando se trabaje con sistemas que impliquen varios productos, en esta fase se procederá a asignar los flujos de materia y energía así como las emisiones al medio ambiente asociadas a cada producto o subproducto.

ANTÓN VALLEJO, 2004

6.1.3 Análisis del Impacto del Ciclo de Vida (AICV)

La estructura de esta fase viene determinada por la normativa ISO 14042, distinguiendo entre elementos obligatorios y elementos opcionales.

Los elementos considerados obligatorios son:

- *Selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos.*
- *Clasificación: en esta fase se asignan los datos procedentes del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado. Una categoría de impacto es una clase que representa las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos.*
- *Caracterización: consiste en la modelización, mediante los factores de caracterización, de los datos del inventario para cada una de dichas categorías de impacto.*

Cada categoría de impacto —por ejemplo acidificación— precisa de una representación cuantitativa denominada indicador de la categoría, —por ejemplo emisión de ácido equivalente. La suma de diferentes intervenciones ambientales para una misma categoría se hará en la unidad del indicador de la categoría. Mediante los factores de caracterización, también llamados factores equivalentes, las diferentes intervenciones ambientales, emisiones de gases, por ejemplo, se convierten a unidades del indicador. Es necesario el uso de modelos para obtener



estos factores de caracterización. La aplicabilidad de los factores de caracterización dependerá de la precisión, validez y características de los modelos utilizados.

ANTÓN VALLEJO, 2004

También existen una serie de elementos opcionales que pueden ser utilizados dependiendo del objetivo y alcance del estudio de ACV:

1. *Normalización: se entiende por normalización la relación de la magnitud cuantificada para una categoría de impacto respecto un valor de referencia ya sea a escala geográfica y/o temporal.*
2. *Agrupación, clasificación y posible catalogación de los indicadores.*
3. *Ponderación: consiste en establecer unos factores que otorgan una importancia relativa a las distintas categorías de impacto para después sumarlas y obtener un resultado ponderado en forma de un único índice ambiental global del sistema.*
4. *Análisis de calidad de los datos: ayudará a entender la fiabilidad de los resultados del AICV. Se considerará obligatorio en análisis comparativos.*

ANTÓN VALLEJO, 2004

6.1.4 Interpretación

La interpretación es la fase de un ACV en la que se combinan los resultados de análisis del inventario con la evaluación de impacto. Los resultados de esta interpretación pueden adquirir la forma de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones. Permite determinar en qué fase del ciclo de vida del producto se generan las principales cargas ambientales y por tanto qué puntos del sistema evaluado pueden o deben mejorarse. En los casos de comparación de distintos productos se podrá determinar cual representa un mejor comportamiento ambiental.

ANTÓN VALLEJO, 2004



VII. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos del ACV, se mostrará de manera detallada etapa por etapa según la metodología ISO 14000.

7.1 Objetivo del estudio

Hacer el análisis de ciclo de vida para el proceso de producción de hidróxido de magnesio utilizado como retardante de flama y determinar el impacto ambiental que provoca dicho proceso, esto para la empresa SAPSA Peñoles.

7.1.1 Consideraciones sobre revisión crítica

Se hizo una revisión crítica por parte del Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable (CADIS) de la ciudad de México.

7.1.2. Alcance del estudio

El presente estudio abarcó desde la materia prima hasta la producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio, es decir de la cuna a la puerta.

El proceso inicia con la extracción de salmuera virgen proveniente de un yacimiento natural ubicado en Laguna del Rey, Coahuila, seguido de una cristalización de sulfato de sodio, de la cual se desprende vapor de agua y sulfato de sodio (el cuál es el producto principal, el hidróxido de magnesio es un subproducto del sulfato de sodio), después entra una salmuera doble gastada a un proceso de cristalización del sulfato de magnesio heptahidratado del cual se desprende una salmuera triple gastada que vuelve al yacimiento para generarse salmuera virgen de nuevo y también se genera el sulfato de magnesio heptahidratado, luego entra este sulfato a un proceso de síntesis al que además se adhiere agua e hidróxido de sodio, luego pasa a un proceso de lavado, luego secado y por último la obtención de nanopartículas.



7.1.3 Unidad funcional y flujo de referencia

La unidad funcional es producir 1 kg de nanopartículas de hidróxido de magnesio.

El flujo de referencia es 1 kg de nanopartículas de hidróxido de magnesio.

7.1.4 Reglas de corte

No aplican las reglas de corte ya que se consideraron todas las etapas del proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio.

7.2 Análisis de Inventario de Ciclo de Vida

7.2.1 Procedimientos de recolección de datos

En cuanto a la obtención de datos, la mayor parte fue enviada por la empresa SAPSA Peñoles en el nombre del Ing. Jesus Manuel Martínez así como del Ing. José Bocanegra. Dichas personas nos proporcionaron el diagrama de flujo del proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio de manera muy general.

En cuanto a la composición de la salmuera virgen que es la materia prima para la obtención de dichas nanopartículas de hidróxido de magnesio, se investigó en varias fuentes bibliográficas y se encontró en el libro sulfato de sodio, en el cuál viene un apartado con donde se manifiesta lo que hace Laguna del Rey en Coahuila, aquí nos indica qué elementos contiene la salmuera virgen y en qué proporción. Posteriormente se envió la información recabada al personal de Peñoles para validar la información y fue satisfactoria.

Para hacer coincidir las entradas con las salidas en el diagrama de proceso que hizo un balance de masas.



Para realizar el proceso de consumo energético, se tomaron los datos de la CFE para saber cómo es que se produce la electricidad en México y los porcentajes pertenecientes a cada tipo de generación de electricidad, es decir, a la termoeléctrica, eólica, nucleoelectrica y carboeléctrica.

En cuanto al producto de nanopartículas de hidróxido de magnesio y su efecto como retardante de flama se tomaron los datos de los informes anuales que Peñoles publica, estos fueron los del 2008 y 2010.

Para los datos del transporte (tipo, capacidad y distancia) se entrevistó al Ing. Jesus Manuel Martínez.

7.2.2 Descripción cualitativa y cuantitativa de los procesos unitarios.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio, así como las tablas de inventario de ciclo de vida (ICV), las tablas de ICV contienen los datos de entrada y salida coincidiendo con el diagrama de flujo del proceso, también incluyen los modelos con los que se alimento el software, las unidades de medida y por último la base de datos utilizada.

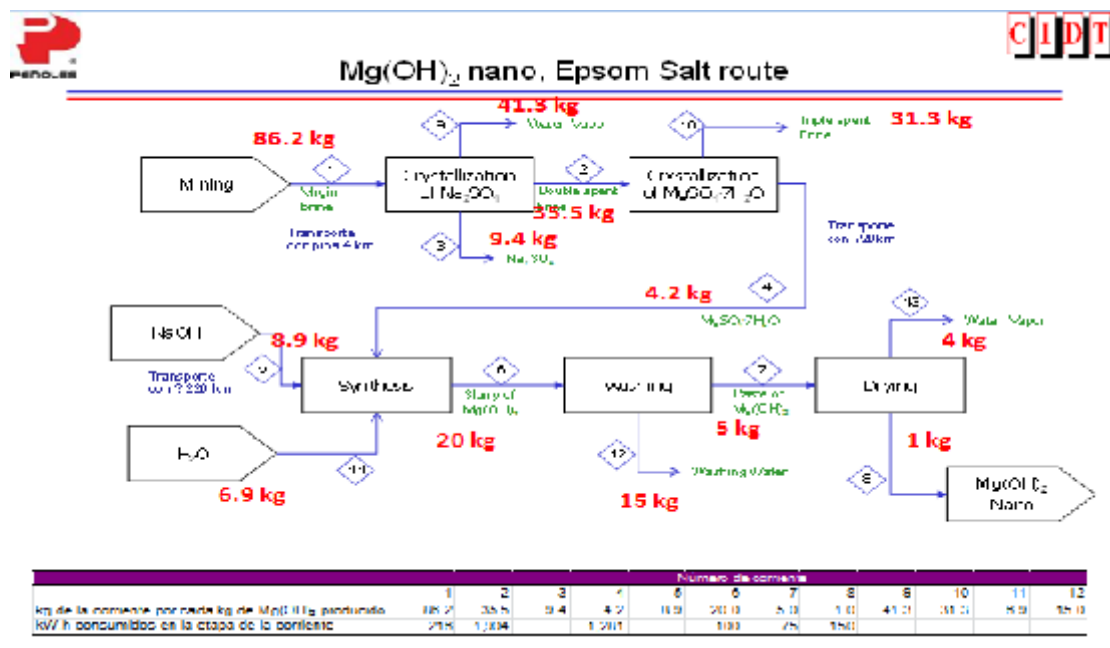


Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio (Empresa Peñoles, 2011).

Tabla 1. Composición de salmuera virgen como materia prima.

Salmuera virgen		Cantidad	Unidad	Modelo	Base de datos
Entradas	%			Sw Simapro	
SO4	16.57	0.1657	kg	Sulfate	Ecoinvent
Cl	4.35	0.0435	kg	Chlorine, in ground	Ecoinvent
Na	5.96	0.0596	kg	Sodium, in ground	Ecoinvent
Mg	2.5	0.025	kg	Magnesium, in ground	Ecoinvent
H2O	70.62	0.7062	kg	Water, process, unspecified natural origin/kg	Ecoinvent
Total	100	1			



Tabla 2. Cristalización de sulfato de sodio.

Cristalización Na₂SO₄	9.4	1	kg	Modelo	Base de datos
Entradas	Cantidad	Cantidad	Unidad		
Salmuera virgen	86.2	9.2	kg	salmuera virgen	Ecoinvent
Energía eléctrica	216.0	23.0	kWh	generación de electricidad/MX U	Generada
Salidas	Cantidad	Cantidad	Unidad		
Salmuera doble gastada (co-producto)	35.5	3.8	kg	salmuera doble gastada	Ecoinvent
Vapor de agua	41.3	4.4	kg	water	Ecoinvent

Tabla 3. Salmuera doble gastada.

Salmuera doble gastada	35.5	1	kg	Modelo	Base de datos
Entradas	Cantidad	Cantidad	Unidad		
Salmuera virgen	68.2	1.9	kg	salmuera virgen	Ecoinvent
Energía eléctrica	170.8	4.8	kWh	generación de electricidad/MX U	Generada
Salidas	Cantidad	Cantidad	Unidad		
Vapor de agua	32.7	0.9	kg	water	Ecoinvent

Tabla 4. Cristalización de sulfato de magnesio heptahidratado.

Cristalización MgSO₄ 7H₂O	4.2	1	kg	Modelo	Base de datos
Entradas	Cantidad	Cantidad	Unidad		
Salmuera doble gastada	35.5	8.5	kg	Salmuera doble gastada	Ecoinvent
Energía eléctrica	1,904.0	453.3	kWh	generación de energía eléctrica/MX U	Generada
Salidas	Cantidad	Cantidad	Unidad		
Salmuera triple gastada (co-producto)	31.3	7.5	kg	Salmuera triple gastada	Ecoinvent

Tabla 5. Transporte para síntesis

Transporte	1	p		Modelo	Base de datos
Material	Cantidad (ton)	Distancia (km)	tkm		
MgSO ₄ 7 H ₂ O	0.0042	220	0.92	Transport, lorry 16-32t, EURO3/RER U	Ecoinvent
NaOH	0.0089	400	3.56	Transport, lorry 16-32t, EURO3/RER U	Ecoinvent

Tabla 6. Síntesis



Síntesis lechada $Mg(OH)_2$	20	1	kg	Modelo	Base de datos
Entradas	Cantidad	Cantidad	Unidad		
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	4.2	0.2			
NaOH	8.9	0.4	kg	Sodium hydroxide, 50% in H_2O , production mix, at plant/RER U	Ecoinvent
Agua	6.9	0.3	kg	Tap water, at user/RER U	Ecoinvent
Energía eléctrica	1,281.0	64.05	kWh	generación de energía eléctrica/MX U	Generada

Tabla 7. Lavado

Lavado pasta $Mg(OH)_2$	5	1	kg	Modelo	Base de datos
Entradas	Cantidad	Cantidad	Unidad		
Lechada $Mg(OH)_2$	20	4.0	kg		
Energía eléctrica	100.0	20.0	kWh	generación de energía eléctrica/MX U	Generada
Salidas	Cantidad	Cantidad	Unidad		
Agua de desecho	15.0	3.0	kg	Waste water/m3	Ecoinvent

Tabla 8. Secado

Secado nanopartículas	1	1	kg	Modelo	Base de datos
Entradas	Cantidad	Cantidad	Unidad		
Pasta $Mg(OH)_2$	5	5.0	kg		
Energía eléctrica	225.0	225.0	kWh	generación de energía eléctrica	Generada
Salidas	Cantidad	Cantidad	Unidad		
Vapor de agua	4.0	4.0	kg	Water	Ecoinvent

7.3 Evaluación de impacto de ciclo de vida

Los métodos de evaluación de impactos que se eligieron fueron el CML y ECO INDICADOR 99 H, el CML llega solo a puntos intermedios, es decir a categorías de impacto las cuales incluyen la huella de carbono, y el ECO INDICADOR 99 H nos muestra las categorías de impacto además de los daños, es decir, llega a puntos finales.

Se utilizó el software simapro 7.3 para determinar los impactos ambientales generados durante el proceso de producción de hidróxido de magnesio.

En la tabla 9 se muestran las categorías de impacto del método CML, las sustancias de referencia, así como las siglas que utilizaremos para abreviar cada categoría de impacto ambiental.



Tabla 9. Método CML

Categoría de impacto	Sustancia de referencia o unidad	Siglas
Potencial de reducción de recursos abióticos	kg Sb eq	PRRA
Potencial de acidificación	kg SO ₂ eq	PA
Potencial de eutrofización	kg PO ₄ eq	PE
Potencial de cambio climático	kg CO ₂ eq	PCC
Potencial de reducción de capa de ozono	kg CFC 11 eq	PRCO
Potencial de toxicidad humana	kg 1.4-DB eq	PTH
Potencial de ecotoxicidad en agua dulce	kg 1.4-DB eq	PEAD
Potencial de ecotoxicidad marina	kg 1.4-DB eq	PEM
Potencial de ecotoxicidad terrestre	kg 1.4-DB eq	PET
Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos	kg 1.4-DB eq	PFOF

En la tabla 10, se muestra el método ECO INDICADOR 99 H con sus categorías de impacto, las sustancias de referencia y las siglas que se utilizarán para nombrar a cada categoría.

Tabla 10. Método ECO INDICADOR 99 H

Categoría de impacto	Sustancia de referencia o unidad	Siglas
Potencial de carcinogénesis	DALY	PC
Potencial de Respiratorios orgánicos	DALY	PRO
Potencial de respiratorios inorgánicos	DALY	PRI
Potencial de cambio climático	DALY	PCC
Potencial de radiación	DALY	PR
Potencial de capa de ozono	DALY	PCO
Potencial de ecotoxicidad	PAF*m2yr	PO
Potencial de acidificación/eutrofización	PDF*m2yr	PA/PE
Potencial de uso de suelo	PDF*m2yr	PUS
Potencial de minerales	MJ surplus	PM
Potencial de combustibles fósiles	MJ surplus	PCF



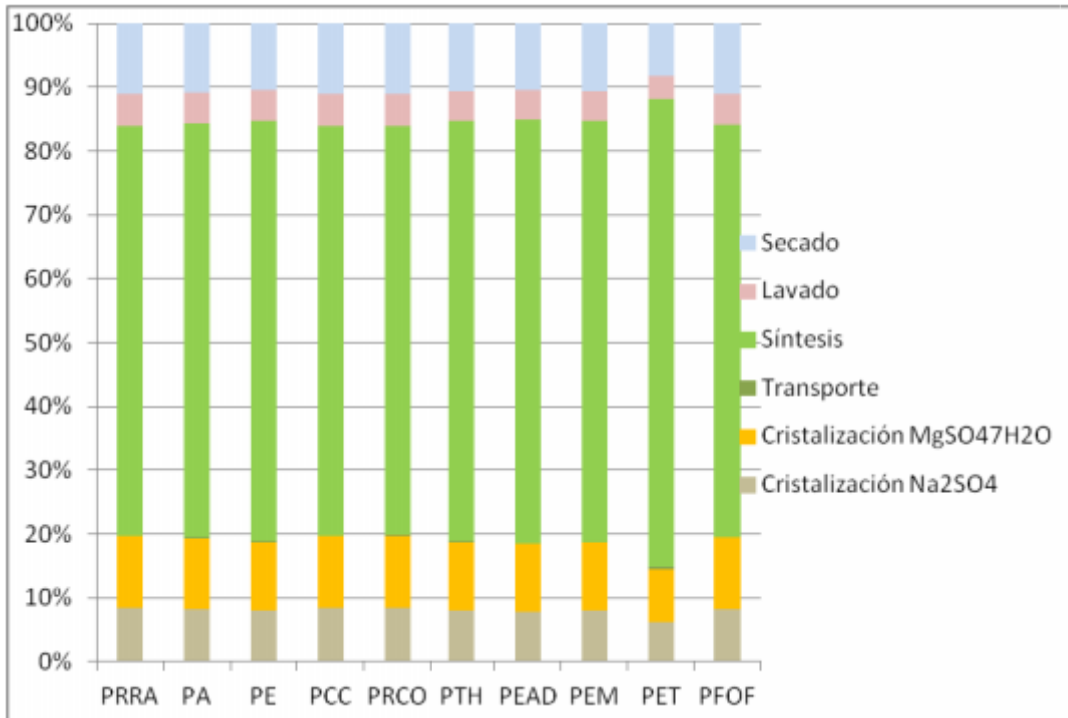
7.3.1 Discusión de resultados

Los resultados de la evaluación de impactos con el método CML se aprecian en la tabla 11 y se hace especial énfasis en la huella de carbono, se puede ver de manera separada por categoría de impacto así como la huella de carbono total.

Tabla 11. Resultados caracterización con método CML

Categoría de impacto	Siglas	Unidad	Cristalización Na_2SO_4	ón $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Transporte síntesis	Síntesis	Lavado	Secado	Total
Potencial de reducción de recursos abióticos	PRRA	kg Sb eq	0.512	0.685	0.006	3.909	0.300	0.674	6.085
Potencial de acidificación	PA	kg SO ₂ eq	0.136	0.182	0.004	1.066	0.080	0.179	1.645
Potencial de eutrofización	PE	kg PO ₄ --- eq	0.043	0.057	0.001	0.353	0.025	0.056	0.536
Potencial de cambio climático	PCC	kg CO₂ eq	61.989	82.918	0.829	474.655	36.294	81.661	738.344
Potencial de reducción de capa de ozono	PRCO	kg CFC-11 eq	5.2E-06	7.0E-06	1.3E-07	4.0E-05	3.0E-06	6.9E-06	6.2E-05
Potencial de toxicidad humana	PTH	kg 1,4-DB eq	11.095	14.841	0.185	90.857	6.496	14.616	138.089
Potencial de ecotoxicidad en agua dulce	PEAD	kg 1,4-DB eq	6.538	8.745	0.066	54.759	3.828	8.612	82.548
Potencial de ecotoxicidad marina	PEM	kg 1,4-DB eq	16062.187	21485.139	146.761	132629.811	9404.201	21159.452	200887.552
Potencial de ecotoxicidad terrestre	PET	kg 1,4-DB eq	0.046	0.061	0.002	0.539	0.027	0.060	0.734
Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos	PFOF	kg C ₂ H ₄ eq	0.007	0.009	0.000	0.053	0.004	0.009	0.082

En la gráfica 1 se ve con mayor facilidad que la etapa del proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio que más impacta al medio ambiente es la síntesis.



Gráfica 1. Caracterización con método CML.

En la tabla 12 se muestran los resultados del método ECO INDICADOR 99 H como evaluador de impacto.

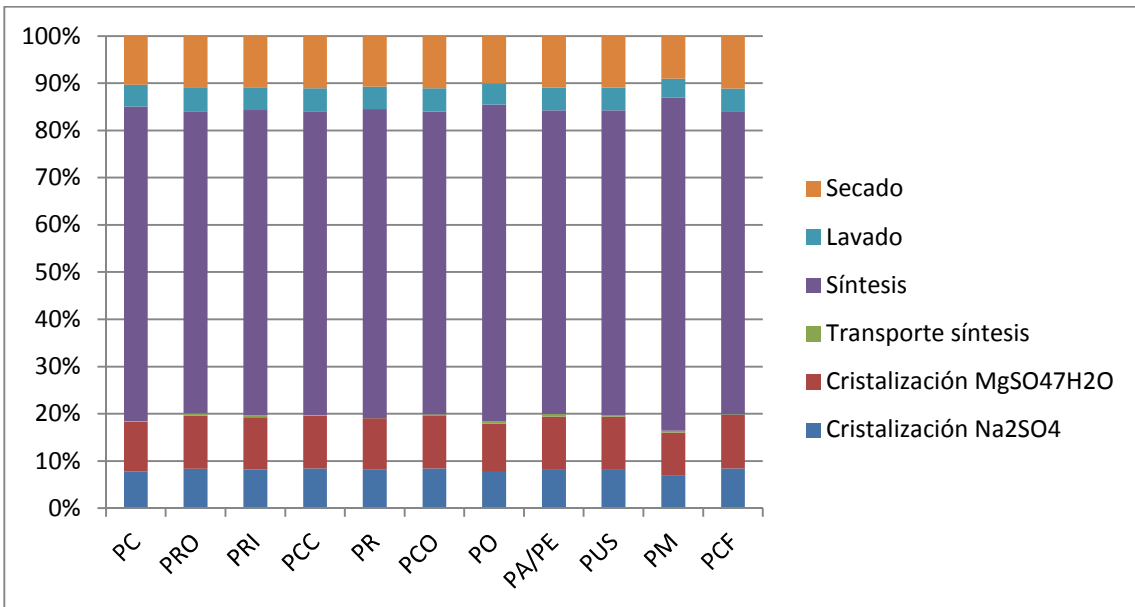
Tabla 12. Resultados de caracterización con método ECO INDICADOR 99 H.

Categoría de impacto	Siglas	Unidad	Cristalización Na ₂ SO ₄	Cristalización MgSO ₄ ·7H ₂ O	Transporte síntesis	Síntesis	Lavado	Secado	Total
Potencial de carcinogénesis	PC	DALY	4.86962E-06	6.51371E-06	6.7708E-08	4.1379E-05	2.8511E-06	6.415E-06	6.20956E-05
Potencial de Respiratorios orgánicos	PRO	DALY	2.06225E-08	2.75851E-08	1.1286E-07	1.5748E-07	1.2074E-08	2.7167E-08	2.46058E-07
Potencial de respiratorios inorgánicos	PRI	DALY	1.5502E-05	2.07358E-05	7.4861E-07	0.00012175	0.0762E-06	2.0421E-05	0.000188232
Potencial de cambio climático	PCC	DALY	1.29587E-05	1.73338E-05	1.7365E-07	9.9231E-05	1.5871E-06	1.7071E-05	0.000154355
Potencial de radiación	PR	DALY	2.79505E-07	3.73872E-07	1.5247E-09	2.2454E-06	1.6365E-07	3.682E-07	3.43214E-06
Potencial de capa de ozono	PCO	DALY	5.50023E-09	7.35723E-09	1.3649E-10	4.1887E-08	3.2203E-09	7.2457E-09	6.53473E-08
Potencial de ecotoxicidad	PO	PAF*m2yr	3.29578347	4.408513204	0.24961524	28.839141	1.92963821	4.34168597	43.06437706
Potencial de acidificación/eutrofización	PA/PE	PDF*m2yr	0.5256154	0.703074839	0.034892	4.0802201	0.80774096	0.69241715	6.343959657
Potencial de uso de suelo	PUS	PDF*m2yr	0.323837636	0.433172418	0.0130339	2.52030227	0.18960271	0.4266061	3.906555129
Potencial de minerales	PM	MJ surplus	0.200913194	0.268745953	0.0119758	2.07234846	0.11763205	0.26467212	2.936291584
Potencial de combustibles fósiles	PCF	MJ surplus	97.92374778	130.9849809	1.6455398	741.519518	7.3330764	128.999422	1158.406285



Como se puede observar, la etapa del proceso de producción de las nanopartículas de hidróxido de magnesio con valores más altos es la síntesis.

En la gráfica 2 se puede ver con mayor claridad lo anterior mencionado, la síntesis es la etapa que más contribuye al impacto ambiental.



Gráfica 2. Caracterización con el método ECO INDICADO 99 H.

En la tabla 13 se muestran los resultados del ECOINDICADOR 99 H con puntuación única y se resalta el total de eco-puntos de potencial de combustibles fósiles que es el total más alto, por lo que se deduce con esta información que el consumo de energía eléctrica es lo que está afectando a esta categoría.

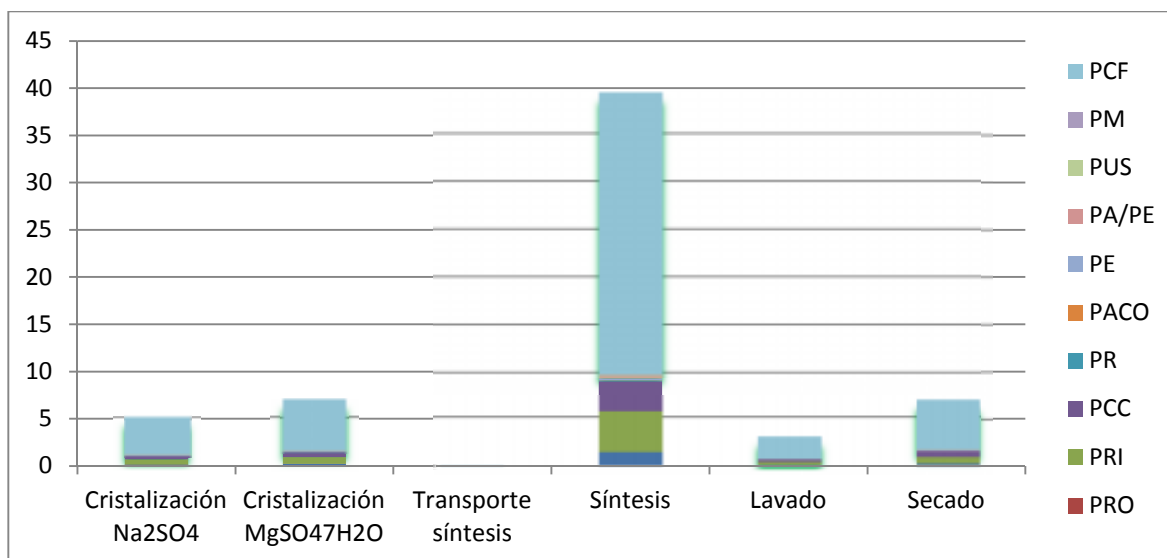
Los resultados de la tabla 13 se muestran en la gráfica 3 y es notablemente más alto el impacto ambiental en la etapa de síntesis por la categoría de potencial de combustibles fósiles.



Para hacerlo más ilustrativo se introdujeron los mismo datos de la tabla 13 en la gráfica 4.

Tabla 13. Puntuación única con método ECO INDICADOR 99 H.

Categoría de impacto	Unidad	Siglas	Cristalización Na_2SO_4	Cristalización $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Transporte síntesis	Síntesis	Lavado	Secado	Total
Potencial carcinogéncios	Pt	PC	0.166687111	0.222964383	0.00231763	1.41638709	0.09759313	0.21958454	2.12553388
Potencial respiratorios orgánicos	Pt	PRO	0.000705908	0.000944238	3.8633E-05	0.00539056	0.0004133	0.00092992	0.00842256
Potencial respiratorios inorgánicos	Pt	PRI	0.530632517	0.709785846	0.02562483	4.16742909	0.31067841	0.69902643	6.44317712
Potencial cambio climático	Pt	PCC	0.443574609	0.593335254	0.00594415	3.39666608	0.25970714	0.58434108	5.28356831
Potencial radiación	Pt	PR	0.009567458	0.012797644	5.2191E-05	0.07685964	0.00560162	0.01260365	0.1174822
Potencial reducción capa ozono	Pt	PACO	0.000188273	0.000251838	4.6721E-06	0.0014338	0.00011023	0.00024802	0.00223684
Potencial ecotoxicidad	Pt	PE	0.023044118	0.030824324	0.00174531	0.20164327	0.01349203	0.03035707	0.30110612
Potencial acidificación/eutrofización	Pt	PA/PE	0.036751029	0.049158993	0.00243959	0.28528899	0.02151725	0.04841381	0.44356966
Potencial uso de suelo	Pt	PUS	0.022642728	0.030287415	0.00091134	0.17621954	0.01325702	0.0298283	0.27314633
Potencial Minerales	Pt	PM	0.007986299	0.010682652	0.0004762	0.08237585	0.00467587	0.01052072	0.11671759
Potencial combustibles fósiles	Pt	PCF	3.892468974	5.206652993	0.06541021	29.4754008	2.27898979	5.12772702	46.0466498



Gráfica 3. Puntuación única con el método de ECO INDICADOR 99 H.

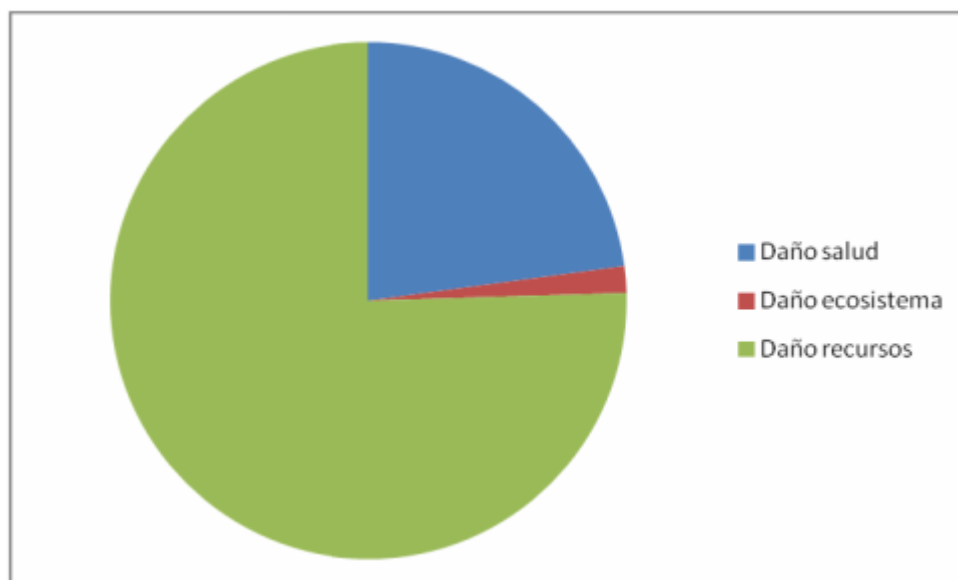


En la tabla 14 se muestran datos de los resultados obtenidos para los daños a la salud, ecosistemas y recursos, esto con el ECO INDICADOR 99 H como método de evaluación de impactos. Notablemente se parecía que el daño potencial más alto es a los recursos esto porque la categoría de potencial de combustibles fósiles se clasifica en este daño.

En la gráfica 4 se hace notar claramente que es el daño a los recursos el mayor afectado

Tabla 14. Total de daños con ECO INDICADOR 99 H

Categoría de daño	Total
Daño salud	13.98042091
Daño ecosistema	1.017822118
Daño recursos	46.16336741



Gráfica 4. Total de daños con ECO INDICADOR 99 H

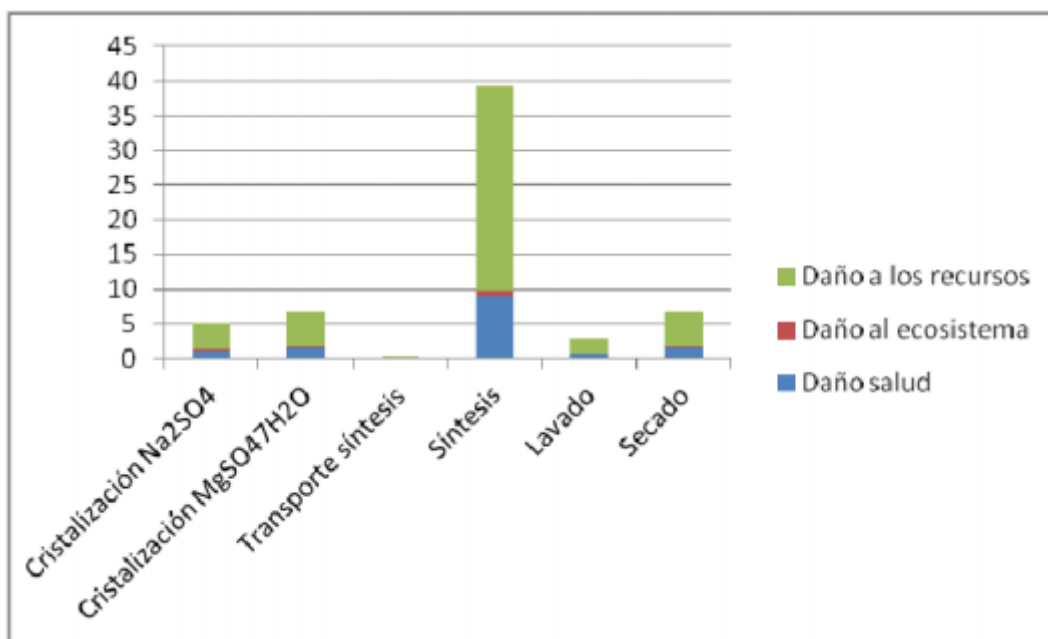
Por último se presenta la tabla 15 en la cual aparecen los resultados obtenidos de los daños por proceso de producción de las nanopartículas, es en el proceso de síntesis con daño a los recursos donde aparece el mayor impacto



ambiental. En la gráfica 5 se aprecia el proceso de síntesis con mayor cantidad de eco-puntos y el daño a los recursos perteneciente a la mayoría de ellos.

Tabla 15. Daño por proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio con ECO INDICADOR 99 H.

Categoría de daño	Cristalización Na_2SO_4	Cristalización $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	Transporte síntesis	Síntesis	Lavado	Secado
Daño salud	1.151355875	1.540079202	0.0339821	9.064166259	0.674103839	1.516733638
Daño al ecosistema	0.082437874	0.110270733	0.00509624	0.663151798	0.0482663	0.108599174
Daño a los recursos	3.900455274	5.217335644	0.06588641	29.55777669	2.28366566	5.138247735



Gráfica 5. Daño por proceso de producción de hidróxido de magnesio con ECO INDICADOR 99 H.

7.4 Interpretación

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante al ACV de nanopartículas de hidróxido de magnesio, la etapa de síntesis del proceso es la que más contribuye al impacto ambiental por su alto consumo de energía eléctrica.



La energía eléctrica es la entrada responsable del potencial de consumo de combustibles fósiles elevado que se manifestó en los resultados mostrados.

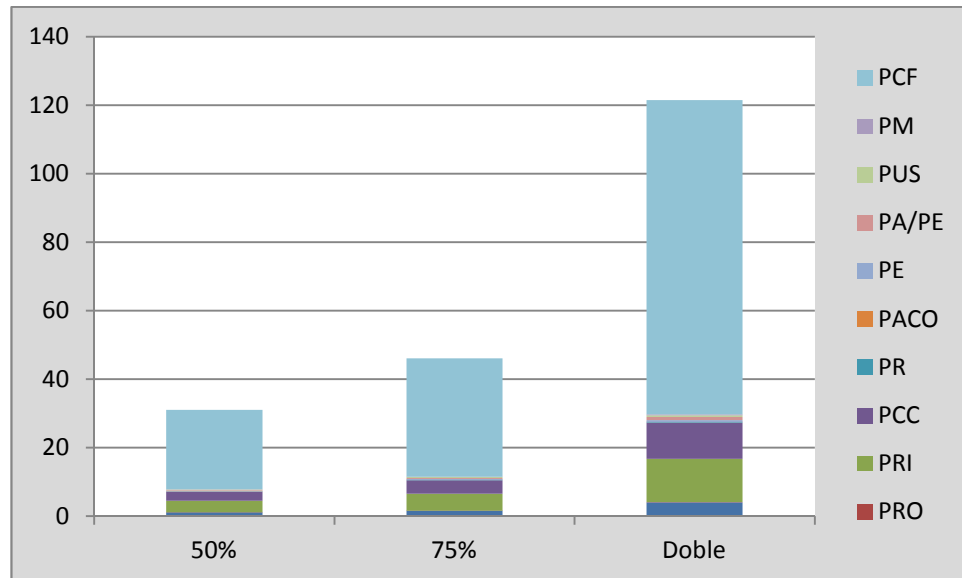
7.4.1 Análisis de sensibilidad

Para asegurar que nuestra interpretación fue de la manera correcta se hizo un análisis de sensibilidad en el cual se hicieron variar los datos de entrada de consumo de electricidad al 50%, al 75% y al doble de los datos que se tenían originalmente.

En la tabla 16 se muestra la variación de los datos originales y en la gráfica 6 se aprecia que el aumento de energía eléctrica es de forma exponencial, es decir, cuanto mayor sea el consumo energético, mayor será el daño.

Tabla 16. Datos de la variación de consume de electricidad para análisis de sensibilidad

Categoría de impacto	Siglas	50%	75%	Doble
Potencial carcinogéncios	PC	1.14736166	1.63677368	4.08383377
Potencial respiratorios orgánicos	PRO	0.00428007	0.00635269	0.01671581
Potencial respiratorios inorgánicos	PRI	3.32925761	4.88725409	12.6772365
Potencial cambio climático	PCC	2.68053154	3.98291625	10.4948398
Potencial radiación	PR	0.06133734	0.08942847	0.2298841
Potencial reducción capa ozono	PACO	0.00113199	0.00168478	0.00444873
Potencial ecotoxicidad	PE	0.16587602	0.23353613	0.57183668
Potencial acidificación/eutrofización	PA/PE	0.22790297	0.3358081	0.87533378
Potencial uso de suelo	PUS	0.14027178	0.20675336	0.53916127
Potencial Minerales	PM	0.0698515	0.09330017	0.21054352
Potencial combustibles fósiles	PCF	23.2044029	34.6331276	91.7767511



Gráfica 6. Gráfico de variación de consumo energético para análisis de sensibilidad.



VIII. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- Se logró hacer un análisis de ciclo de vida con los datos de inventario que se recopilaron y se siguió la metodología que la norma ISO 14000 establece.
- El ACV tuvo una revisión crítica por parte de personal calificado del Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable (CADIS) de la ciudad de México.
- El proceso de producción de nanopartículas de hidróxido de magnesio que más impacta al medio ambiente es la síntesis.
- Del proceso de producción de síntesis su mayor impacto se debe al consumo de electricidad.
- Haciendo un análisis de sensibilidad nos da como resultado un crecimiento exponencial del daño al medio ambiente, es decir, entre más cantidad de energía eléctrica se utilice mayor será el daño al deterioro de combustibles fósiles.
- Tanto el método de evaluación de impactos CML como ECOINDICADOR 99 H coinciden en que la etapa de síntesis es la que mayor impacto provoca.

8.2 Limitaciones

- La obtención de la información fue tardada ya que la empresa esta ubicada en Torreón Coahuila por lo que solo se hicieron dos visitas a la planta, las demás dudas y aclaraciones se hicieron vía correo electrónico confiando en la respuesta del personal de Peñoles.



- El software que CIMAV adquirió no tiene la opción de realizar un análisis de incertidumbre, además de que la empresa no nos proporcionó una desviación estándar.

8.3 Recomendaciones

- Profundizar en cuanto a los datos de consumo energético y checar con la empresa SAPSA Peñoles si es que su generación de electricidad es solo por parte de la CFE o es que tienen una generación interna de la misma.
- Hacer un análisis de incertidumbre de los datos teniendo la desviación estándar y la indicada versión del software.



IX. REFERENCIAS

ANTÓN VALLEJO, MA. ASUNCIÓN (2004) Metodología del análisis del ciclo de vida, en Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo, tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Cataluña, . http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0420104-100039/#documents .

Awuah-Offei K, Checkel D, Askari-Nasab H (2008a) Evaluation of belt conveyor and truck haulage systems in an open pit mine using life cycle assessment. CIM Bulletin, Vol. 102, Paper 8, pp 1–6

Chacón Vargas, Jairo Raúl (2008). Métodos de apoyo para una gestión ambiental en las organizaciones. Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, año 18, No. 70, abril-junio, 43-72.

Durucan S, Korre A, Munoz-Melendez G (2006) Mining life cycle modelling: a cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry. J Clean Prod 14:1057– 1070

GaBi 4 Demo Manual, Instructions Getting started-database

GONÇALVES, ARTUR JORGE DE JESÚS (2004) El análisis de ciclo de vida y su aplicación a la arquitectura y al urbanismo, trabajo desarrollado en la asignatura Por una ciudad más sostenible. El planeamiento urbano frente al paradigma de la sostenibilidad del Doctorado en Ciudades, Periferias y Vitalidad Urbana. Madrid: ETSAM.

Gestión Ambiental - Análisis de ciclo de vida – Principios y marco de referencia
Norma NMX-SSA-14040-IMNC-2008
ISO 14040:2006
Instituto Mexicano de Normalización y Certificación A.C.

Gestión Ambiental - Análisis de ciclo de vida – Requisitos y directrices
Norma NMX-SSA-14044-IMNC-2008



ISO 14044:2006
Instituto Mexicano de Normalización y Certificación A.C.

Ginnée B., Jeroen (final editor), Gorrée, Marieke, Heijungs, Reinout, Huppés, Gjalt, Kleijn René, De Koning, Arjan, Van Oers, Laurant, Sleswijk, Wegener, Anneke, Suh, Sangwon, Udo de Haes, Helias, De Brujin, Hans, Van Duin, Robbert, Huijbregts, Mark, Lindeijer, Erwin, Roorda, Aksel & Van der Ven, Bernhard (2002).

Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Iglesias, Daniel H. "Relevamiento exploratorio del análisis del ciclo de vida de productos y su aplicación en el sistema agroalimentario" en Contribuciones a la Economía, febrero 2005

Mangena SJ, Brent AC (2006) Application of a life cycle impact assessment framework to evaluate and compare environmental performances with economic values of supplied coal products. J Clean Prod 14:1071–1084

Mark A. Shand, 2006 The Chemistry and technology of magnesia

Peñoles y Draka desarrollan nuevo recubrimiento plástico anti-incendios. Energy Information Administration (2008) Electric power monthly—November 2009, Report No. DOE/EIA-0226 (2009/11), p 14

Portal de ciencia y tecnología, "Nuevos aspectos sobre los contaminantes bromados", julio 2009.

Spitzley DV, Tolle DA (2004) Evaluating land-use impacts: selection of surface area metrics for life-cycle assessment of mining. J Indust Ecol 8(1–2):11–21

Suppen N, Carranza M, Hueta M, Hernandez MA (2006) Environmental management and life cycle approaches in the Mexican mining industry.



TRAMA, LUIS Y TROIANO, JUAN CARLOS (2001) «Análisis del ciclo de vida según las normas de la subserie IRAM-ISO 14040», Construir, número 57, enero/febrero, ISBN 987-01-0174-7.