

Análisis de Ciclo de Vida de la Producción de una Botella de Leche Destinada a la Elaboración de Pan Artesanal mediante OpenLCA

Life Cycle Assessment of Milk Bottle Production for Artisan Bread Making Using OpenLCA

Miguel Ángel Ruiz Torres¹, Guillermina Gallaga Jiménez², Francisco Javier Zavala Lugo²,
André Paolo Sandoval Gallegos², Daniela Andrea González Cruz²

¹ Escuela de Nivel Medio Centro Histórico León, Colegio de Nivel Medio Superior, Universidad de Guanajuato.

² Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Colegio de Nivel Medio Superior, Universidad de Guanajuato.
ma.ruiz@ugto.mx

Resumen

El presente estudio analiza la etapa de producción de una botella de leche como parte del proceso global requerido para la elaboración de pan artesanal. Se desarrolló un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) bajo el enfoque De la Cuna a la Puerta, con el propósito de identificar los impactos ambientales asociados a la obtención de materias primas, transformación de polímeros y transporte involucrado. Para la evaluación se empleó OpenLCA v.2.4.0 y se utilizaron datos provenientes de literatura especializada y bases de datos disponibles en acceso abierto. Los resultados muestran que el tereftalato de polietileno (PET) es el material con mayor contribución en las categorías de calentamiento global, ecotoxicidad terrestre y consumo de agua. Estos hallazgos permiten establecer una primera aproximación al impacto ambiental de los insumos necesarios en la cadena de producción del pan artesanal, aportando información útil para futuros estudios integrales del proceso.

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida; impacto ambiental; OpenLCA; polímeros; sostenibilidad.

Introducción

Hoy en día, el consumo de pan forma parte del estilo de vida moderno y se prevé un crecimiento de la demanda. El consumo de pan artesanal en México está en aumento, impulsado por una creciente preferencia por productos más saludables y de mayor calidad. A medida que aumenta la demanda, se generará presión sobre el medio ambiente.

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una metodología estandarizada que permite evaluar de manera sistemática los impactos ambientales potenciales de un producto, proceso o servicio durante todas las etapas de su existencia. Estas etapas incluyen desde la extracción de materias primas, la producción, distribución, uso y hasta su disposición final. El objetivo del ACV es proporcionar una visión integral de los efectos ambientales para identificar oportunidades de mejora en términos de sostenibilidad. Esta herramienta es especialmente útil en la toma de decisiones informadas dentro de políticas ambientales, diseño ecológico y desarrollo de productos sostenibles, y es ampliamente utilizada por industrias, instituciones y gobiernos comprometidos con la reducción del impacto ambiental y la transición hacia una economía más circular.¹

La versatilidad de los ACV se extiende a diversas aplicaciones:²

- **Diseño:** Modificar productos para minimizar el impacto ambiental.
- **Compras:** Comparar productos para elegir la opción más respetuosa con el medio ambiente.
- **Marketing:** Resaltar la amigabilidad ambiental de un producto en comparación con competidores.
- **Comparación:** Evaluar el rendimiento ambiental de una empresa en comparación con sus pares de la industria.
- **Seguimiento:** Monitorear cambios en el rendimiento ambiental con el tiempo.
- **Políticas:** Informar sobre el desarrollo de iniciativas para mejorar los resultados ambientales generales.

Principales contenidos de la ISO 14040

La norma ISO 14040:2006 establece los principios y el marco general para realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Es parte de la familia de normas ISO 14000 sobre gestión ambiental. La norma define el ACV como: "La recopilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un sistema de producto a lo largo de su ciclo de vida". Para realizar el ACV es necesario contar con los elementos establecidos de acuerdo con la norma ISO 14040 y son los que se presentan en la Figura 1.

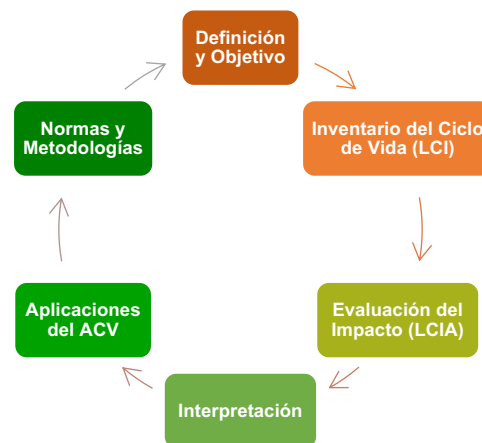


Figura 1. Contenidos de la ISO 14040.

La ISO 14040 sirve como guía para organizaciones que desean evaluar y mejorar el desempeño ambiental de sus productos o procesos a lo largo del tiempo.³ Existen diferentes tipos de ACV, desde evaluaciones conceptuales básicas hasta evaluaciones detalladas específicas del producto. El nivel de detalle y especificidad de los datos varía según el alcance y los objetivos de la evaluación.

- ACV Conceptual: Evaluación cualitativa básica para comprender los impactos ambientales relativos.
- ACV Simplificado: Evaluación exhaustiva que se centra en aspectos ambientales críticos, utilizando datos más genéricos.
- ACV Detallado: Recopilación de datos en profundidad específicos para el producto, proceso o actividad en cuestión.⁴

A su vez, el ACV se divide en varias categorías:

De la Cuna a la Tumba (Cradle-to-Grave): Evalúa todo el ciclo de vida, desde la fabricación hasta la disposición del producto, teniendo en cuenta todas las entradas y salidas en cada fase.

De la Cuna a la Puerta (Cradle-to-Gate): Se centra en la evaluación de una parte del ciclo de vida, desde la fabricación hasta la puerta de la fábrica, excluyendo las fases de uso y disposición. A menudo se utiliza como base para Declaraciones Ambientales de Producto.

De la Cuna a la Cuna (Cradle-to-Cradle): Es una variante específica de la evaluación de la cuna a la tumba, donde el final de la vida útil del producto implica un proceso de reciclaje, generando nuevos productos idénticos o diferentes.

Análisis de Energía del Ciclo de Vida (LCEA): Enfocado en contabilizar todas las entradas de energía a un producto, abarcando tanto la energía directa durante la fabricación como la necesaria para producir componentes, materiales y servicios. La fuente de energía sea fósil o renovable, es un aspecto crucial en este análisis.⁵

Existen varios softwares de ACV que son herramientas que evalúan el impacto de productos o servicios a lo largo de todas sus etapas, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Éstos ayudan a las organizaciones a identificar las áreas de oportunidad para reducir su huella ambiental, cumplir con regulaciones y tomar decisiones sostenibles. Entre los softwares más reconocidos y utilizados a nivel mundial son: SimaPro, Gabi(Sphera), OpenLCA, One Click LCA y Air e LCA. Sin embargo, algunos requieren de licencias para su uso y además, están limitados por las bases de datos de que se dispongan. OpenLCA, es un software gratuito y de código abierto, ideal para cálculo rápido y fiable de la sostenibilidad y ACV.

Diversas investigaciones ambientales sobre el pan se han realizado en varios países.⁶ El ACV involucra a diversos actores, no solo al ámbito académico, sino también a los productores de diversas actividades.

En este contexto, el objetivo de esta investigación es analizar los impactos ambientales asociados a la producción de una botella de leche —insumo requerido en la elaboración de pan artesanal— mediante un Análisis de Ciclo de Vida bajo el enfoque De la Cuna a la Puerta utilizando OpenLCA v.2.4.0.

Metodología

Se realizó el ACV para la elaboración de pan artesanal, tomando como estudio del proceso a la etapa de la producción del envase de leche, que es una de una de las materias primas empleadas. La botella para elaboración consta de: polietileno de alta densidad (material de la tapa), polipropileno (etiquetas) y polietileno (materiales del envase), Figura 2. Para lo cual se realizó el pesado de cada material para contar con esta información que será utilizada en OpenLCA v.2.4.0.



Figura 2. Materiales que conforman la botella de leche.

Las etapas consideradas para la producción de la botella para este estudio son las que se mencionan a continuación y son de las que se tiene más información reportada.

- Producción de granulado de plástico, para el polietileno de alta densidad, el propileno y el polietileno para los componentes de plástico.
- Enseguida se transporta y luego se producen los componentes (botella, tapas y etiqueta)
- Nuevamente se transporta a otro lugar donde se realizará el llenado de la botella después de haber sido inflada, agregándole la tapa y la etiqueta.
- Finalmente, la botella llena se transporta hacia el punto de venta.

Los datos del inventario que se introducen en el software OpenLCA se presentan en la Tabla 1. En esta tabla se muestran los flujos, la cantidad de los materiales empleados, parámetros que son introducidos en el software, así como los materiales y proveedores (los cuales fueron seleccionados porque son de los que se tiene más información reportada en la literatura).

Tabla 1. Inventario para la producción de una botella de leche.

Etapas	Flujo	Cantidad	Parámetro	Flujo	Categoría	Proveedor
Producción de granulado	Tereftalato de polietileno (PET)	0.031 kg	PET_1	Polyethylene terephthalate (PET) granulate	Materials production/Plastics	Polyethylene terephthalate (PET) granulate, production mix, at plant, amorphous – RER
	Polipropileno (PP)	0.005 kg	PP_1	Polypropylene granulate (PP)	Materials production/Plastics	Polypropylene granulate (PP), production mix, at plant – RER
	Polietileno de alta densidad (PE-HD)	0.004 kg	PE_1	Polyethylene high density granulate (PE-HD)	Materials production/Plastics	Polyethylene high density granulate (PE-HD), production mix, at plant-RER
Transporte y producción de componentes plásticos	Transporte kg*km	200 km	D_1	Transport t*km	Transport services/ Other transport	Small lorry transport, Euro 0,1,2,3,4 mix, 7.5t, total weight, 3,3t max payload-RER
		0.04	BV_1			
Transporte botevacía	Transporte kg*km	200 km	D_2	Transport t*km	in	
Transporte de botella llena	Líquido	1.028 kg		Drinking water	Materials production	Drinking water, production mix, at plant water purification treatment, from groundwater
		1.068	BF_1	Transport t*km	in	Transport services/ Other transport
		50 km	D_3			
	Transporte total kg*km			Transport t*km	in	Transport services/ Other transport
						Small lorry transport, Euro 0,1,2,3,4 mix, 7.5t, total weight, 3,3t max payload-RER

En las Figuras 3a) y 3b) se presentan los datos que fueron introducidos al programa OpenLCA v.2.4.0. Como puede observarse, en la Figura 3a) se definen los materiales empleados para la producción de los granulados de los materiales, el transporte, proveedores y para este estudio se sustituye el agua por la leche (siendo afectado el valor de este parámetro por la densidad de la leche), esto debido a que la base de datos para alimentos requiere de una licencia para su consulta. En la Figura 3b) se muestran los flujos de cada elemento presentado en inventario.

Inputs/Outputs - Botella_de_leche

Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenu...	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality ...	Location	Description
polyethylene high density ...	Materials production/Plastics	0.00400	kg		none		Polyethyle...			
polyethylene terephthalate...	Materials production/Plastics	0.03100	kg		none		Polyethyle...			
polypropylene granulate (P...	Materials production/Plastics	0.00500	kg		none		Polypropyl...			
transport in t*km	Transport services/Other tran...	69.40000	kg*km		none		Small lorry...			
drinking water	Materials production/Water	1.02800	kg		none		Drinking w...			

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenu...	Uncertainty	Avoided pro...	Provider	Data quality ...	Location	Description
Flujo_botella_de_leche	Botella_de_leche	1.00000	Item(s)		none					

Parameters - Botella_de_leche

Global parameters

Input parameters

Name	Value	Uncertainty	Description
PE_1	0.004	none	Polielileno de alta densidad
PET_1	0.031	none	Tereftalato de polietileno
PP_1	0.005	none	Polipropileno
BV_1	0.04	none	Botella vacía
D_1	200.0	none	Distancia 1
D_2	200.0	none	Distancia 2
BF_1	1.068	none	Botella llena
D_3	50.0	none	Distancia 3

Dependent parameters

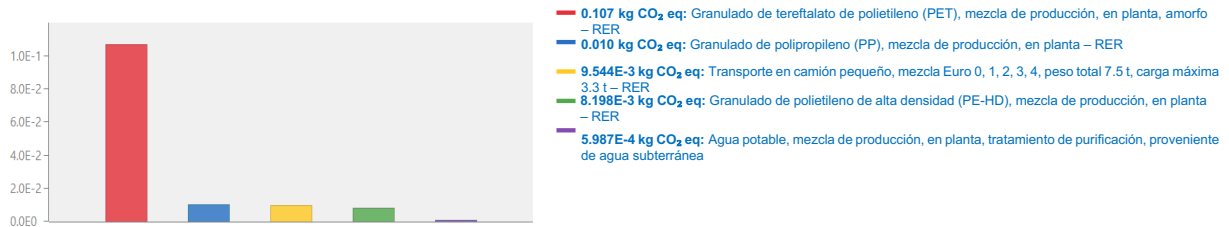
Name	Formula	Value	Description

General information | Inputs/Outputs | Documentation | **Parameters** | Allocation | Social aspects | Direct impacts

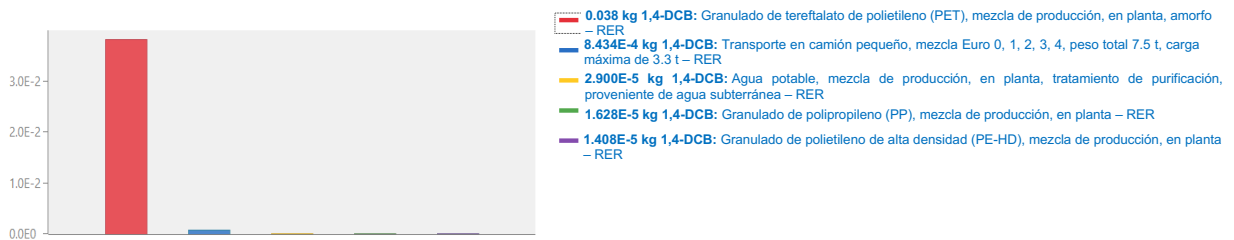
Figura 3. a) Flujos y categorías de las materias primas para la etapa de la producción de la botella de leche. b) Parámetros y flujos involucrados en la etapa.

Resultados

El ACV para la producción de una botella de leche se compone de las etapas: producción del granulado, transporte de las materias primas, transporte de la botella vacía y transporte de la botella llena. En las Figuras 4a), 4b) y 4c) se pueden observar las contribuciones de impacto para las categorías: calentamiento global, ecotoxicidad terrestre y consumo de agua. En los tres gráficos se puede observar que el PET granulado es la materia prima que tiene una mayor contribución al impacto para la producción de una botella de leche.



a)



b)



c)

Figura 4. Contribuciones de impacto por categoría. a) Calentamiento global, b) ecotoxicidad terrestre y c) consumo de agua.

En la Tabla 2 se presentan las categorías de impacto ambiental por los desechos que generan durante la producción de la botella de leche. En esta tabla se puede apreciar que las categorías que tienen mayor impacto son: calentamiento global, ecotoxicidad terrestre y consumo de agua, correspondientes a 0.13522 kg CO₂ eq, 0.03913 kg 1,4-DCB y 0.00296 m³, respectivamente.

Tabla 2. Evaluación de impactos para la producción de una botella de leche empleando la metodología RECIPE-2016 Midpoint (H) en OpenLCA v.2.4.0.

	Flujo	Evaluación de impactos
<i>Formación de partículas finas</i>		0.00014 kg PM2.5 eq
	Dióxido de azufre	0.00010 kg PM2.5 eq
	Dióxido de nitrógeno	3.67602E-5 kgPM2.5 eq
	Partículas < 2.5 um	1.82762E-6 kgPM2.5 eq
<i>Ecotoxicidad de agua dulce</i>		8.17175E-6 kg 1,4-DCB
	Decano	6.20451E-6 kg 1,4-DCB
	Cobre	7.59156E-7 kg 1,4-DCB
	Zinc	5.68468E-7 kg 1,4-DCB
	Níquel	4.41630E-7 kg 1,4-DCB
<i>Eutrificación de agua dulce</i>		9.01145E-7 kg P eq
	Fosfato	8.98319E-7 kg P eq
<i>Calentamiento global</i>		0.13522 kg CO ₂ eq
	Dióxido de carbono	0.11143 kg CO ₂ eq
	Metano	0.02371 kg CO ₂ eq
<i>Ecotoxicidad marina</i>		3.27462E-5 kg 1,4-DCB
	Níquel	2.14681E-5 kg 1,4-DCB
	Zinc	4.87480E-6 kg 1,4-DCB
	Aromáticos	1.75345E-6 kg 1,4-DCB
	Cobre	1.25262E-6 kg 1,4-DCV
	Zinc	8.05554E-7 kg 1,4-DCB
	Vanadio	5.15308E-7 kg 1,4-DCB
<i>Eutrificación marina</i>		1.52485E-7 kg N eq
	Nitrato	7.08685E-8 kg N eq
	Nitrógeno	4.28425E-8 kg N eq
	Amonio	3.82551E-8 kg N eq
<i>Escasez de recursos minerales</i>		1.34109E-6 kg Cu eq
	Hierro	8.7918E-7 kg Cu eq
	Barita	1.54646E-7 kg Cu eq
	Plomo	8.83964E-8 kg Cu eq
	Zinc	6.3234E-8 kg Cu eq
	Bentonita	6.76881E-8 kg Cu eq
	Fósforo	5.15549E-8 kg Cu eq
	Cobre	1.72593E-8 Cu eq
<i>Formación de ozono, salud humana</i>		5.89497E-5 kg NOx eq
	Compuestos orgánicos volátiles	5.89497E-5 kg NOx eq
<i>Formación de ozono, ecosistemas terrestres</i>		9.49746E-5 kg NOx eq
	Compuestos orgánicos volátiles	9.49746E-5 kg NOx eq
<i>Agotamiento del ozono estratosférico</i>		3.02509E-9 kg CFC11 eq
	Monóxido de dinitrógeno	3.00800E-9 kg CFC11 eq
<i>Acidificación terrestre</i>		0.00047 kg SO ₂ eq
	Dióxido de azufre	0.00035 kg SO ₂ eq

	Flujo	Evaluación de impactos
	Dióxido de nitrógeno	0.00012 kg SO ₂ eq
<i>Ecotoxicidad terrestre</i>		0.03913 kg 1,4-DCB
	Níquel	0.03823 kg, 1,4-DCB
	Vanadio	0.00063 kg, 1,4-DCB
<i>Consumo de agua</i>		0.00296 m ³
	Agua	0.0019 m ³
	Agua subterránea	0.00105 m ³

Conclusiones

El análisis realizado permitió identificar que la producción de la botella de leche, empleada como insumo en la elaboración de pan artesanal, presenta impactos ambientales relevantes en distintas categorías evaluadas mediante OpenLCA v.2.4.0. El PET granulado es el material que mayor contribución presenta en calentamiento global, ecotoxicidad terrestre y consumo de agua, lo que coincide con reportes previos sobre el comportamiento ambiental de este polímero. Estos resultados constituyen una primera aproximación al análisis integral de los insumos asociados a la producción de pan artesanal y sientan las bases para ampliar el estudio hacia otras etapas del proceso, incluyendo la producción del alimento y su distribución.

Bibliografía/Referencias

1. International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. ISO. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
2. CSR Consulting Staff. (2024, 12 de febrero). Un vistazo al análisis del ciclo de vida (ACV). CSR Consulting. Recuperado de <https://www.csrconsulting.com.mx/blog/un-vistazo-al-analisis-del-ciclo-de-vida-acv/>
3. ISO. (2006). ISO 14040:2006 - Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia. Organización Internacional de Normalización.
4. Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701–720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>
5. Baumann, H., & Tillman, A.-M. (2004). The Hitch Hiker's Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application. Studentlitteratur.
6. Hartono, N. (2018). Case study of life cycle assessment in bread production process. *Earth and Environmental Science*, 195. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/195/1/012043>