

Sustentabilidad de materiales para el envasado de refrescos implementando un Análisis de Ciclo de Vida mediante SolidWorks Sustainability

Roberto Carlos Cabriales Gómez, Yessica Marlen Arroyo Mayorga, Diana Cobos Zaleta,
Luis Arturo Reyes Osorio
Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
roberto.cabrialesgm@uanl.edu.mx, yessica.arroyomrg@uanl.edu.mx, diana.coboszl@uanl.edu.mx,
Luis.reyessr@uanl.edu.mx

RESUMEN

Este trabajo utiliza el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) a través de SolidWorks Sustainability para evaluar el impacto ambiental de envases de vidrio, aluminio y PET de 355 ml utilizados por Coca-Cola en México. Los cuatro impactos medidos incluyen la huella de carbono, consumo de energía, acidificación atmosférica y eutrofización del agua. Se analizan etapas desde la selección del material hasta el fin de vida útil, considerando factores como región de fabricación, tiempo de uso, proceso de fabricación y transporte. Se emplean datos de SEMARNAT, la Cámara de Diputados, FEMSA y Arca Continental para obtener resultados y comparar la sustentabilidad de los materiales de envasado.

PALABRAS CLAVE

Desarrollo sostenible, impactos ambientales, envases de refrescos, Análisis de Ciclo de Vida (LCA).

ABSTRACT

This work employs Life Cycle Assessment (LCA) using SolidWorks Sustainability to assess the environmental impact of 355 ml glass, aluminum, and PET packaging used by Coca-Cola in Mexico. The four measured impacts include carbon footprint, energy consumption, atmospheric acidification, and water eutrophication. It analyzes stages from material selection to end-of-life, considering factors such as manufacturing region, usage period, production process, and transportation. Data from SEMARNAT, the Chamber of Deputies, FEMSA, and Arca Continental are used to obtain results and compare the sustainability of packaging materials.

KEYWORDS

Sustainable development, environmental impacts, soft drink packaging, Life Cycle Assessment (LCA).

INTRODUCCIÓN

El desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.¹

En la actualidad, se busca lograr el desarrollo sostenible mediante el estudio de los posibles impactos ambientales asociados con bienes de consumo y servicios. Esto ha aumentado el uso de métodos para una mejor comprensión de estos impactos, a fin de reducirlos.

Los refrescos son productos de alto consumo en nuestra sociedad, y para facilitar su distribución, se requiere utilizar envases. Esto implica procesos productivos que generan una serie de impactos ambientales. Por tanto, la industria refresquera se ve obligada a desarrollar estrategias de sostenibilidad centradas en la producción y reciclaje de los materiales de envasado.

El Poli-tereftalato de etileno (PET), el vidrio y el aluminio son los principales materiales utilizados. De entre estos, el PET es el más empleado debido a su facilidad de procesamiento y menor costo, además de su versatilidad y resistencia. Sin embargo, el porcentaje de PET reciclado es mínimo en comparación con su alta producción y amplio uso. Como resultado, la cantidad de residuos plásticos generados es alarmante, pues se ha convertido en un grave problema ambiental. Por ello, el análisis de los impactos de este material ha sido el foco de la investigación ambiental.

Desde una perspectiva científica, es necesario considerar todos los efectos ambientales, cuantificándolos con valores y cantidades de acuerdo a metodologías estandarizadas respaldadas por organismos internacionales. El análisis, cálculo y evaluación de los impactos ambientales asociados con la producción de los materiales de envasado de refrescos en las diferentes etapas de su ciclo de vida contribuye a la toma de medidas tecnológicas y ambientalmente responsables para lograr un desarrollo sostenible real. Esto se logra a través de un Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés *Life Cycle Assessment*).

El origen del Análisis de Ciclo de Vida se remonta a 1969 cuando en EE. UU. The Coca Cola Company financió un estudio que tenía como objetivo la reducción del consumo de recursos ya que inicialmente se consideraba que el consumo energético tenía mayor prioridad respecto a la generación de residuos, las descargas y emisiones hacia el medioambiente,² que posteriormente evolucionó y dio lugar a esta herramienta LCA para evaluar los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o proceso.

El Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta reconocida y aceptada por la comunidad científica e industrial, puesto que permite la toma de decisiones referentes a políticas ambientales y de sustentabilidad. Existen distintos estudios que implementan dicha herramienta. Por ejemplo, en³ evalúan el proceso de fabricación de envases de vidrio. Sin embargo, no se reportan resultados que cuantifiquen los impactos ambientales asociados a cada uno de los procesos de manufactura involucrados.



Fig. 1. Etapas del ciclo de vida del producto.⁴

En un primer momento, realizar un Análisis de Ciclo de Vida se mostraba como un procedimiento agotador, dado que involucraba la recopilación y gestión de datos con el fin de evaluar los impactos ambientales. En la actualidad, estos estudios son realizados mediante el uso de bases de datos de Inventarios de Ciclo de Vida y softwares comerciales. Esto posibilita la comparación del impacto ambiental entre distintos materiales.⁵

En este contexto SolidWorks Sustainability es una herramienta accesible que está integrada de SolidWorks. Fundamentalmente, se trata de un LCA de comprobación, la cual permite realizar la evaluación del ciclo de vida de un producto durante el diseño. Esto perfecciona el proceso si se debe realizar una revisión de cumplimiento completa certificada por la ISO 14044:2006, la cual especifica los requisitos y ofrece directrices concretas para la realización de un LCA. Entre ellos se encuentran: la definición del objetivo y el alcance del LCA, la fase de interpretación del ciclo de vida, el informe final y la revisión crítica.⁶

Ahora bien, el bajo desarrollo tecnológico en reciclaje de latas de aluminio genera que más del 50 % se exporte a Estados Unidos, donde las transforman en artículos diversos que van desde nuevamente latas de alimentos y/o bebidas, hasta material de construcción o autopartes, consumida en mayor parte por el sector automotriz. La producción de aluminio a partir de aluminio reciclado requiere un 90 % menos de energía que hacerlo a partir del mineral.⁷

En cuanto al vidrio, el hecho de que sus envases se puedan reciclar al cien por ciento sin pérdida de calidad ni cantidad, contribuye a la percepción de ser un material calificado como sustentable.⁸ Sin embargo, el proceso de soplado con que se fabrica el vidrio es una actividad que requiere de mucha energía. El gas natural, el combustóleo y la electricidad son las fuentes de energía primordiales este proceso.⁹



Fig. 2. Principales embotelladoras en México que se incluyen en este trabajo.¹⁰

En 2002 el Gobierno del Distrito Federal reportó que en México la mayoría de la resina de PET se emplea en la fabricación de botellas para contener refrescos, con el 52.8 %. En México se comenzó a utilizar para la fabricación de botellas a partir de 1985, teniendo gran aceptación por parte del

consumidor, por lo que su uso se ha incrementado considerablemente año tras año.¹¹ Nadie se sorprende de que Coca-Cola sea la bebida carbonatada más consumida en México. Las dos principales embotelladoras del sistema Coca-Cola con una destacada presencia en el territorio mexicano son Coca-Cola Femsa y Arca Continental (figura 2).

A partir de estas consideraciones, la hipótesis de esta investigación plantea que al utilizar un software de Análisis de Ciclo de Vida, es posible obtener una comprensión precisa del impacto ambiental real del PET en comparación con otras opciones de envasado. La intención es desmitificar la creencia común de que el vidrio es la elección más ecológica. Al desafiar y explorar estas concepciones arraigadas, el estudio aspira a aportar de manera significativa al conocimiento sobre la sostenibilidad de los materiales de envasado en la industria de bebidas. Se busca proporcionar información valiosa para la toma de decisiones informadas y fomentar prácticas más sostenibles en la gestión de envases.

Este trabajo evalúa la sustentabilidad de tres envases fabricados de vidrio, aluminio y PET utilizados en el envasado de refrescos, implementando un Análisis de Ciclo de Vida mediante la herramienta SolidWorks Sustainability. La base de datos que utiliza SolidWorks Sustainability es un conjunto de impactos ambientales obtenidos a través de una combinación de experimentación científica y resultados empíricos adquiridos en campo, pertenecientes a GaBi, que es un software y base de datos de referencia en sustentabilidad. Simultáneamente, emplea la herramienta y metodología TRACI de evaluación del impacto desarrollada por la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos, la cual proporciona factores de caracterización para la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (LCIA, por sus siglas en inglés), la ecología industrial y las métricas de sostenibilidad.

METODOLOGÍA

Modelado de sólidos 3D

Las mediciones de los tres tipos de envases (vidrio, aluminio y PET), cada uno de 355 ml, se llevaron a cabo utilizando instrumentos como balanza de precisión, regla métrica y calibrador vernier digital.

Una vez obtenidas las medidas reales, se realiza el diseño de los sólidos 3D utilizando el programa SolidWorks 2021 (figura 3), considerando la máxima precisión posible en cuanto a la masa y tamaño de los objetos reales. Posteriormente, se aplicó el material correcto de acuerdo al envase simulado (vidrio, aluminio o PET). Finalmente, se aplicó una apariencia de renderizado de manera que el modelo mostrara la mayor semejanza posible con el original.



Fig. 3. Envases utilizados en el estudio junto a sus modelos 3D renderizados.¹⁰

Diseño de Experimentos

Se definieron los escenarios o experimentos de simulación ejecutados. Esto consistió en la adecuada manipulación de las variables vinculadas al material, fabricación, utilización, transporte y fin de vida útil. Esto nos permite medir el efecto relacionado con el impacto medioambiental y la sustentabilidad del material. Se establecieron cuatro casos de estudio con datos reales:

- Caso I, Nivel Nacional, considerando datos reportados por SEMARNAT y la Cámara de Diputados de México.^{12, 13}
- Caso II, Nivel Regional, de acuerdo con datos reportados por la Planta Jalisco de Coca-Cola Arca Continental con distribución a San Luis Potosí.^{14, 15}
- Caso III, Nivel Estatal, considerando datos reportados por la Planta San Cristóbal de las Casas de Coca-Cola FEMSA con distribución a Tuxtla Gutiérrez, en el mismo estado de Chiapas.¹⁶
- Caso IV, Nivel Interestatal, a partir de los datos emitidos por Planta Toluca de Coca-Cola FEMSA con distribución a CDMX. En este caso de estudio se evalúa únicamente aluminio y PET, dado que la Planta Toluca descarta la producción de envases de vidrio.¹⁷

Se establecieron la misma región de fabricación, el mismo período de duración y la misma región de utilización como parámetros constantes en los cuatro casos. Por otro lado, las principales diferencias fueron el contenido de material reciclado y el proceso de manufactura utilizado (tabla I).

Tabla I. Parámetros iniciales establecidos en el análisis para los casos I, II, III y IV.

Variables	Vidrio	Aluminio	PET
Región de fabricación	Norteamérica	Norteamérica	Norteamérica
Contenido de reciclado	20%	0%	0%
Período de duración	1 año	1 año	1 año
Proceso	Personalizado	Chapa metálica troquelada/conformada	Moldeo por inyección
Pintura	Sin pintura	Pintura con disolvente	Sin pintura
Región de utilización	Norteamérica	Norteamérica	Norteamérica
Período de utilización	1 año	1 año	1 año

Más aún, se establecieron las variables dependientes de cada caso, tales como la distancia en kilómetros de transporte terrestre. La variable de control que puede afectar los resultados es el fin de la vida útil, expresado en el porcentaje de la cantidad de material reciclado, incinerado o enviado como desecho a vertederos o rellenos sanitarios. (tabla II).

Tabla II. Variables dependientes y variables de control para los casos I, II, III y IV.

Caso	Variables	Vidrio	Aluminio	PET
1 Nivel nacional	Transporte terrestre	2575 km	2575 km	2575 km
	Fin de vida útil	Reciclado: 12% Incinerado: 0% Vertedero: 88%	Reciclado: 97% Incinerado: 0% Vertedero: 3%	Reciclado: 20% Incinerado: 10% Vertedero 70%
2 Nivel regional	Transporte terrestre	773 km	773 km	773 km
	Fin de vida útil	Reciclado: 93% Incinerado: 0% Vertedero: 7%	Reciclado: 97% Incinerado: 0% Vertedero: 3%	Reciclado: 60% Incinerado: 10% Vertedero 30%
3 Nivel estatal	Transporte terrestre	61 km	61 km	61 km
	Fin de vida útil	Reciclado: 93% Incinerado: 0% Vertedero: 7%	Reciclado: 97% Incinerado: 0% Vertedero: 3%	Reciclado: 50% Incinerado: 10% Vertedero 40%
4 Nivel interestatal	Transporte terrestre		65 km	65 km
	Fin de vida útil		Reciclado: 97% Incinerado: 0% Vertedero: 3%	Reciclado: 50% Incinerado: 5% Vertedero 45%

Después de configurar los materiales y de ejecutar SolidWorks Sustainability, el software proporciona información sobre el impacto ambiental del diseño en términos de huella de carbono, energía consumida, agua utilizada y otros indicadores (figura 4).

En concreto, el software evalúa cuatro impactos ambientales: huella de carbono, energía total consumida, acidificación del aire y eutrofización del agua.

Huella de carbono: La huella de carbono es una medida de la cantidad total de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono (CO₂), liberados a la atmósfera como resultado de las actividades humanas o de la producción de un producto específico. Se expresa comúnmente en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) y se utiliza para evaluar el impacto climático de una actividad o producto.

Energía total consumida: La energía total consumida se refiere a la cantidad total de energía utilizada en todas las etapas del ciclo de vida de un producto o proceso. Esto incluye la energía necesaria para extraer materias primas, fabricar, transportar, utilizar y desechar el producto. Se mide generalmente en unidades de energía, como joules (J) o megajoules (MJ).

Acidificación del aire: La acidificación del aire se refiere al aumento de la acidez de la atmósfera debido a la liberación de compuestos químicos ácidos, como óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x), a través de actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles. Esta acidificación puede tener efectos negativos en el medio ambiente, incluyendo la degradación de suelos y cuerpos de agua. La acidificación del aire se presenta en unidades de equivalentes en ácido PH/kg con factores de ponderación siguientes: 31.25 equivalentes de ácido/kg para el SO₂, 21.74 equivalentes de ácido/kg para el NO₂.

Eutrofización del agua: La eutrofización del agua es un proceso en el cual los cuerpos de agua, como ríos, lagos y embalses, reciben un exceso de nutrientes, como nitrógeno y fósforo, generalmente a través de la escorrentía agrícola o el vertido de aguas residuales. Esto puede conducir a un crecimiento excesivo de algas y plantas acuáticas, al agotamiento de oxígeno y demás problemas ambientales, como la muerte de peces y la degradación de la calidad del agua. La unidad de medida típica para evaluar el impacto de la eutrofización del agua es la concentración de nutrientes, expresada comúnmente en miligramos por litro (mg/L) o partes por millón (ppm).

Estas métricas ayudan a tomar decisiones informadas para reducir el impacto ambiental y fomentar la sostenibilidad.

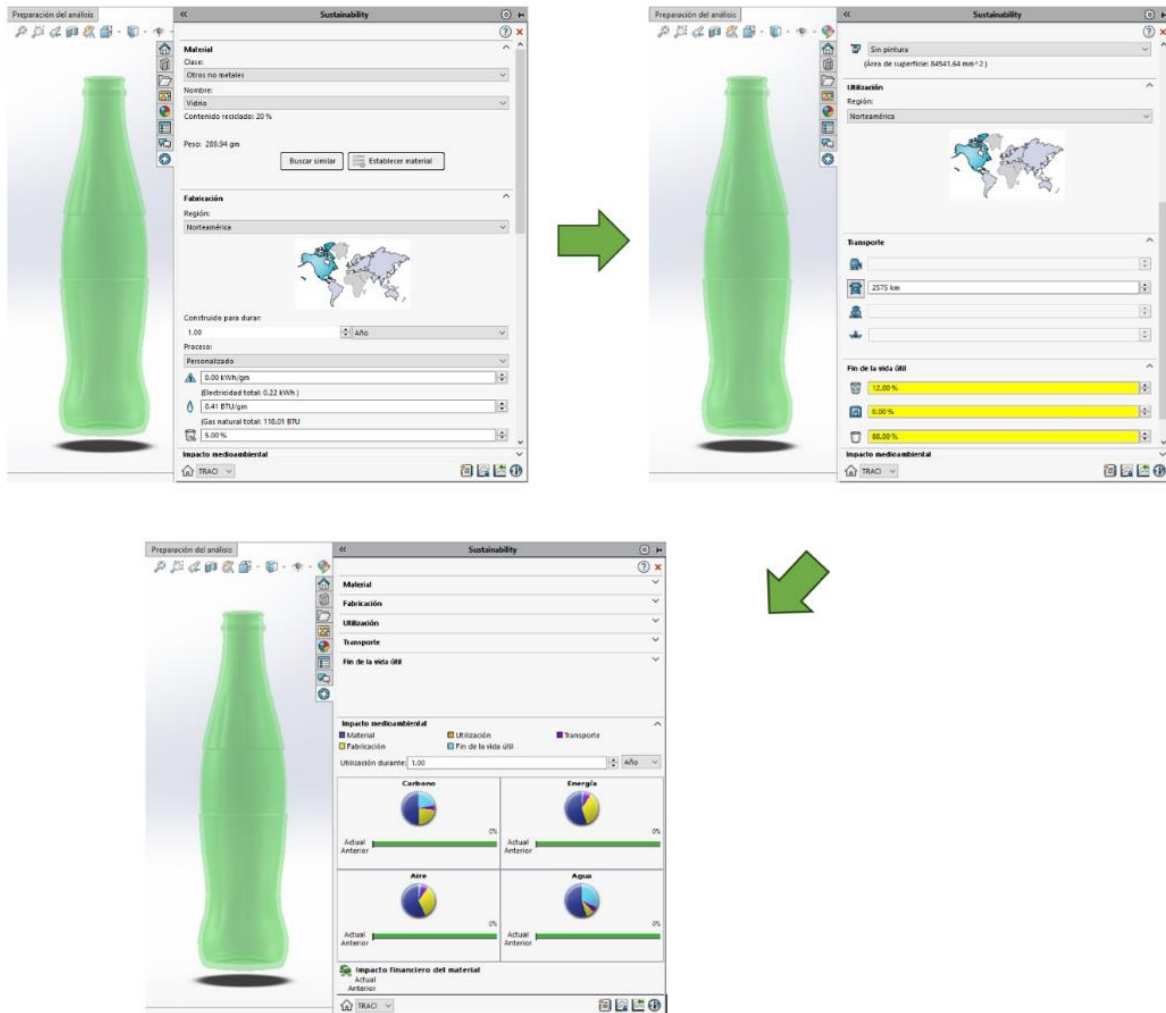


Fig. 4. Flujo de trabajo de SolidWorks Sustainability una vez que se tiene el modelo 3D.

RESULTADOS

Caso de estudio I

En la tabla III se presentan los resultados totales del impacto ambiental evaluado para cada uno de los materiales analizados en el Caso de estudio I. En todos los impactos evaluados, el vidrio muestra el mayor impacto ambiental, seguido por el aluminio y el PET.

Hay que destacar que la mayor parte del impacto ambiental se genera durante las etapas de obtención del material y fabricación.

En la figura 6 se proporciona un desglose detallado de los resultados totales de impacto ambiental por cada envase, dividiéndolos en categorías que incluyen la obtención del material, el proceso de fabricación, el transporte y el reciclado o fin de vida útil. La suma de estos valores representa el impacto total en las unidades correspondientes.

Tabla III. Comparativa de resultados para caso de estudio I (análisis nacional) de impactos medioambientales asociados a cada material.

Impacto ambiental	Vidrio	Aluminio	PET
Huella de carbono	0.813 kg CO ₂ e	0.301 kg CO ₂ e	0.095 kg CO ₂ e
Energía total consumida	7.6 MJ	5.1 MJ	1.8 MJ
Acidificación atmosférica	0.172 mol H ⁺ e	0.078 mol H ⁺ e	0.017 mol H ⁺ e
Eutrofización del agua	2.4E-4 kg N e	3.6E-5 kg N e	1.2E-5 kg N e

Caso de estudio II

La tabla IV presenta los resultados totales correspondientes al Caso de estudio II. La diferencia principal con respecto al Caso I radica en una menor distancia recorrida durante la distribución del producto, así como en un mayor porcentaje de reciclaje de vidrio y PET, según datos reportados por Arca Continental. Se observa que, en el caso del vidrio, hay una disminución en las métricas de los cuatro impactos ambientales evaluados, en comparación con el Caso I. Esto se atribuye a la menor distancia recorrida en el análisis y al aumento de su reciclaje. Sin embargo, es importante destacar que el vidrio prevalece como el material con el mayor impacto ambiental. Por otro lado, es relevante destacar la disminución en la energía total consumida en el estudio del vidrio, debido a que se considera un mayor uso de material reciclado basado en datos de Arca Continental, que recicla más vidrio en comparación con el promedio nacional (dato utilizado en el Caso I).

Al reducir la distancia recorrida para la distribución, el aluminio muestra una menor huella de carbono y eutrofización del agua. Se sitúa en segundo lugar en cuanto a impacto ambiental. Por su parte, el PET exhibe el menor impacto y presenta una disminución en su huella de carbono, acidificación atmosférica y eutrofización del agua. Esto se atribuye al aumento de su reciclaje.

La figura 7 presenta los resultados para cada material. Se muestran los cuatro impactos desglosados en valores asociados a la obtención del material, proceso de fabricación, transporte y reciclado o fin de vida útil. La suma de estos valores proporciona el total de la métrica correspondiente al impacto en sus respectivas unidades.

Tabla IV. Comparativa de resultados para Caso de estudio II (análisis regional) de impactos medioambientales asociados a cada material.

Impacto ambiental	Vidrio	Aluminio	PET
Huella de carbono	0.623 kg CO ₂ e	0.299 kg CO ₂ e	0.089 kg CO ₂ e
Energía total consumida	7.1 MJ	5.1 MJ	1.8 MJ
Acidificación atmosférica	0.160 mol H ⁺ e	0.078 mol H ⁺ e	0.016 mol H ⁺ e
Eutrofización del agua	1.6E-4 kg N e	3.5E-5 kg N e	9.3E-6 kg N e

Caso de estudio III

La tabla V presenta los resultados totales correspondientes al Caso de estudio III. La principal diferencia con respecto a los Casos I y II es una menor distancia durante el recorrido para la distribución del producto, además de una disminución en el porcentaje de reciclado durante el fin de vida útil del PET, según datos reportados por FEMSA. Se observa un cambio en las métricas de impacto para el vidrio y el PET. Se registra una menor acidificación atmosférica y huella de carbono, además de una ligera disminución en la energía total consumida durante el estudio del vidrio. Esto se debe a que, en este análisis, se establece un mayor reciclaje del vidrio en comparación con el promedio nacional (dato utilizado en el Caso I) y una distancia de recorrido menor que la establecida en los Casos I y II.

Por otro lado, debido al menor reciclado de PET, se observa un ligero incremento en la huella de carbono y en la eutrofización del agua.

El vidrio continúa siendo el material con el mayor impacto ambiental, seguido por el aluminio en segunda posición y posteriormente el PET.

La figura 8 presenta los resultados para cada material. Se señalan los cuatro impactos desglosados en valores asociados a la obtención del material, proceso de fabricación, transporte y reciclado o fin de vida útil. La suma de estos valores proporciona el total de la métrica correspondiente al impacto en sus respectivas unidades.

Tabla V. Comparativa de resultados para Caso de estudio III (análisis estatal) de impactos medioambientales asociados a cada material.

Impacto ambiental	Vidrio	Aluminio	PET
Huella de carbono	0.613 kg CO ₂ e	0.299 kg CO ₂ e	0.090 kg CO ₂ e
Energía total consumida	6.9 MJ	5.1 MJ	1.8 MJ
Acidificación atmosférica	0.156 mol H ⁺ e	0.078 mol H ⁺ e	0.016 mol H ⁺ e
Eutrofización del agua	1.6E-4 kg N e	3.5E-5 kg N e	9.6E-6 kg N e

Caso de estudio IV

La tabla VI presenta los resultados totales del impacto ambiental evaluado para el aluminio y el PET. Las principales diferencias con respecto a los Casos I y II incluyen una menor distancia de recorrido durante la distribución, aunque mayor en comparación con el Caso III. Además, se registra una disminución en el porcentaje de material incinerado durante el fin de vida útil del PET, según datos reportados por FEMSA. En este caso de estudio se evalúa únicamente aluminio y PET, dado que la Planta Toluca descarta la producción de envases de vidrio.

En el caso del aluminio, no se observan diferencias significativas en sus impactos al compararlo con los Casos de estudio II y III. No obstante, su impacto ambiental sigue siendo menor en comparación con el Caso de estudio I, debido a la mayor distancia de recorrido en este último.

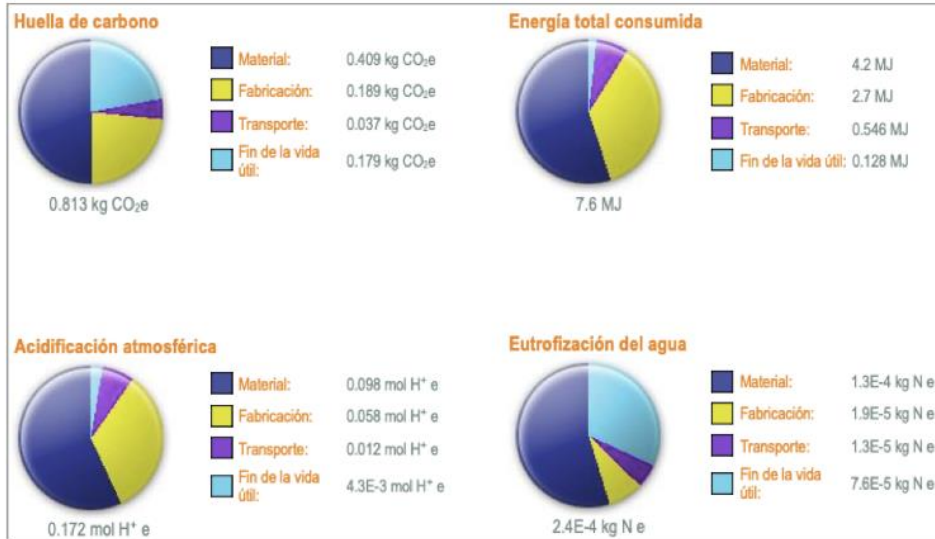
Por otro lado, el PET muestra una disminución en su huella de carbono y eutrofización del agua en comparación con los Casos de estudio I, II y III.

La figura 9 ofrece un desglose detallado de los resultados totales de impacto ambiental en valores correspondientes a la obtención del material, proceso de fabricación, transporte y reciclado o fin de vida útil. La suma de estos valores representa el impacto total en las unidades correspondientes.

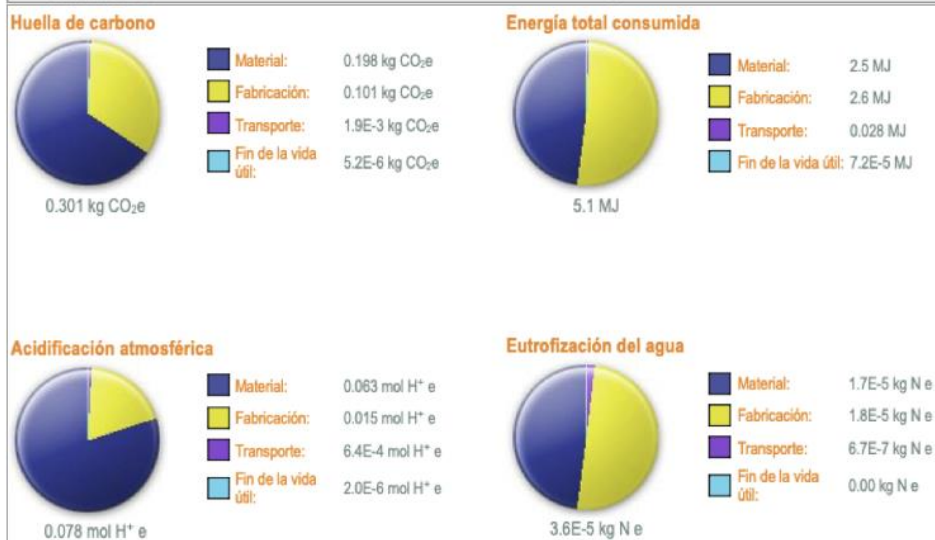
Tabla VI. Comparativa de resultados para Caso de estudio IV (nivel interestatal) de impactos medioambientales asociados a cada material.

Impacto ambiental	Aluminio	PET
Huella de carbono	0.299 kg CO ₂ e	0.089 kg CO ₂ e
Energía total consumida	5.1 MJ	1.8 MJ
Acidificación atmosférica	0.078 mol H ⁺ e	0.016 mol H ⁺ e
Eutrofización del agua	3.5E-5 kg N e	9.8E-6 kg N e

Botella de vidrio



Lata de aluminio



Botella de PET

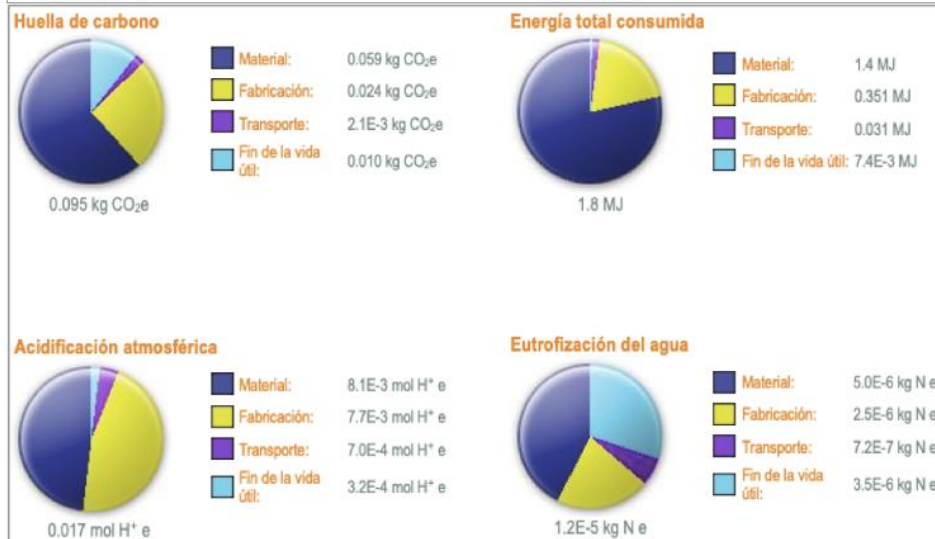
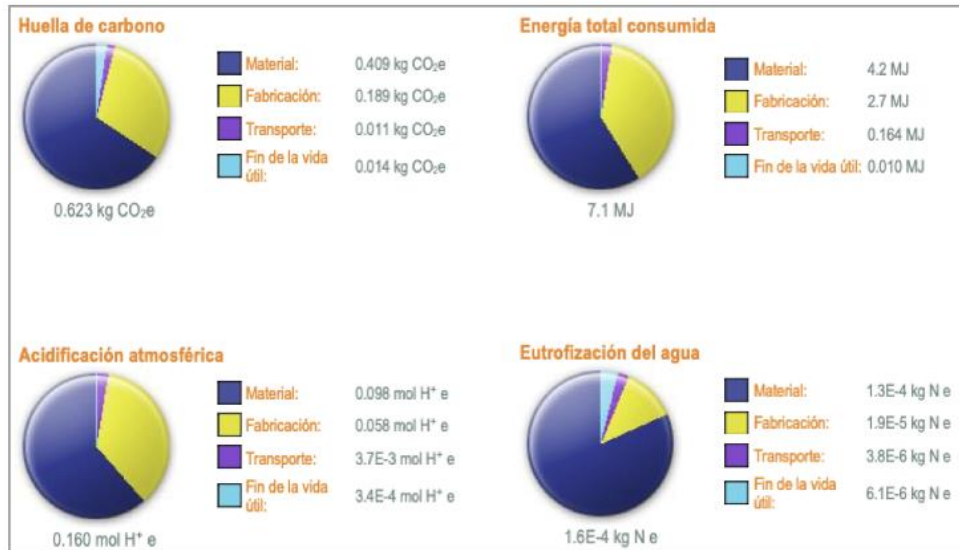
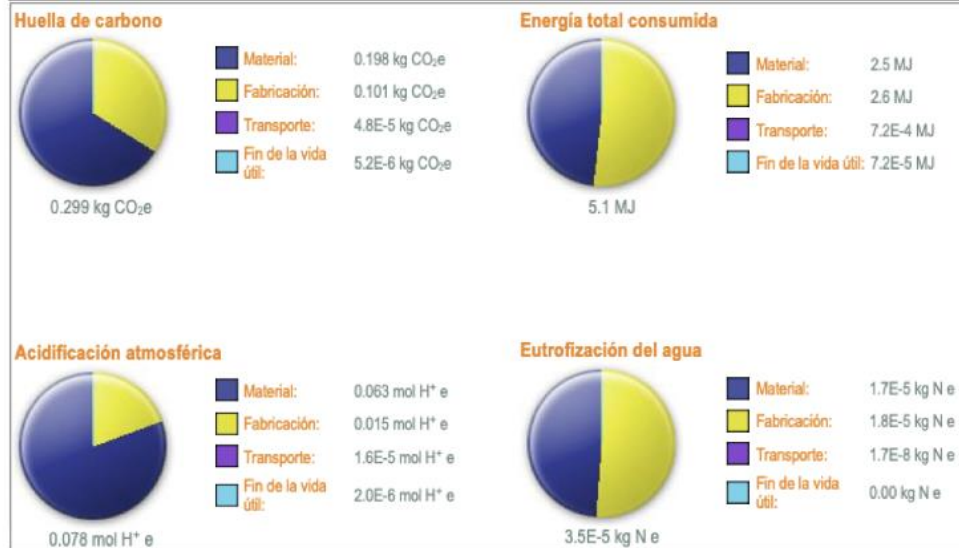


Fig. 6. Informe de sustentabilidad de envases en el caso de estudio I (análisis nacional).

Botella de vidrio



Lata de aluminio



Botella de PET

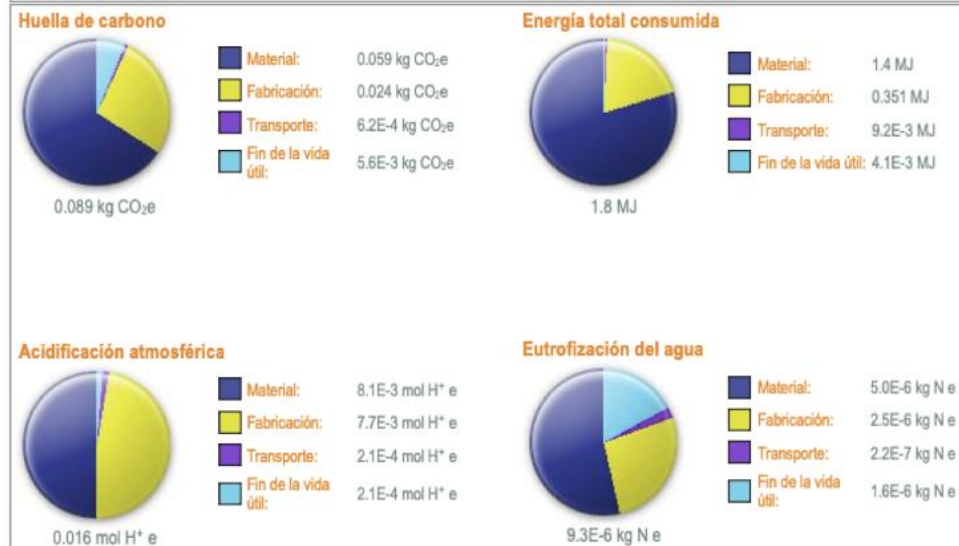
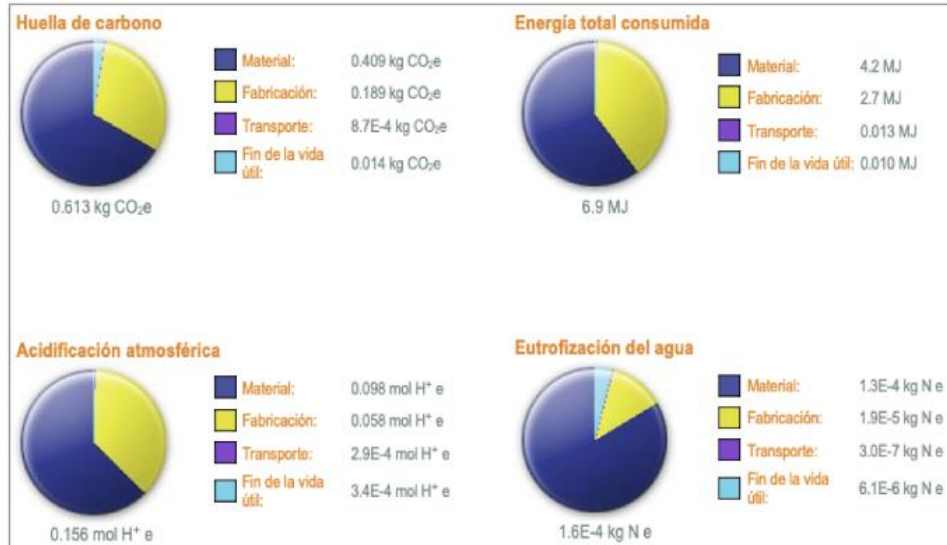
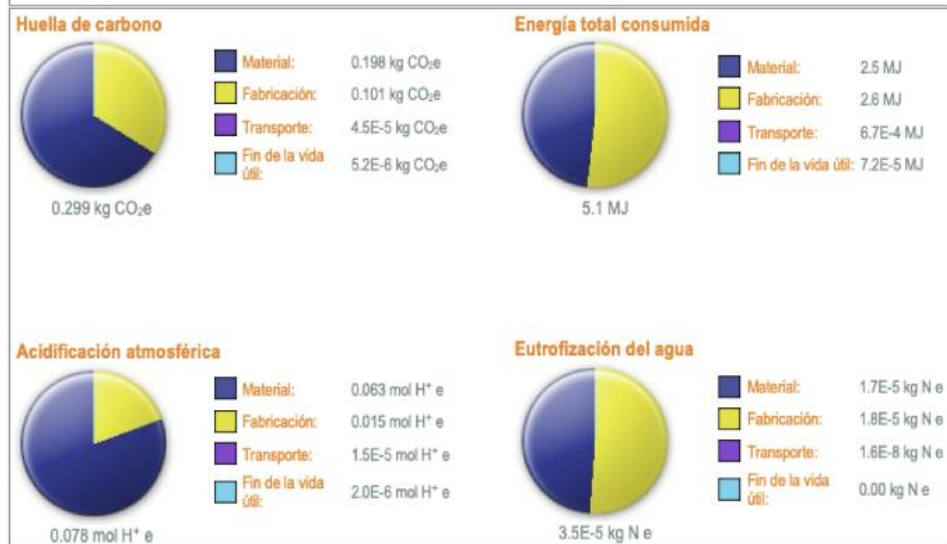


Fig. 7. Informe de sustentabilidad de envases en el caso de estudio II (análisis regional).

Botella de vidrio



Lata de aluminio



Botella de PET

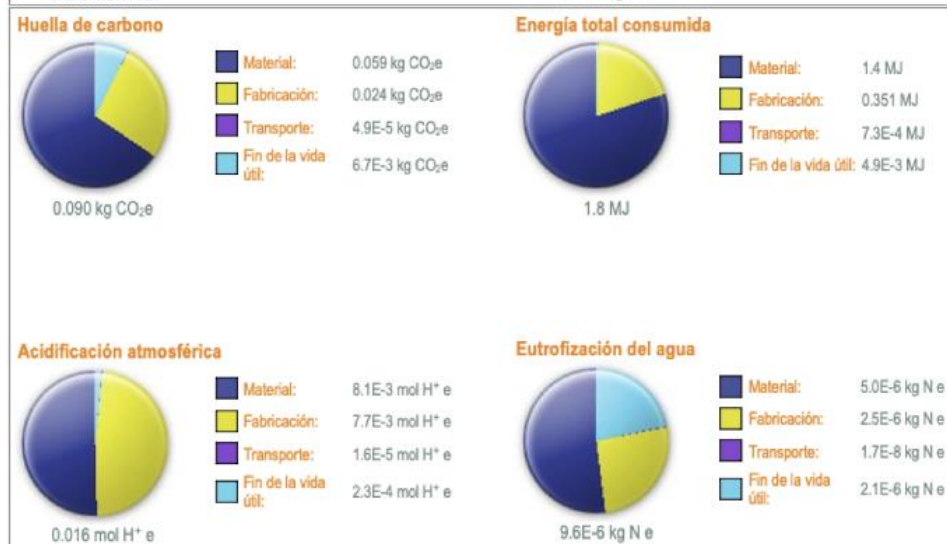


Fig. 8. Informe de sustentabilidad de envases en el caso de estudio III (análisis estatal).

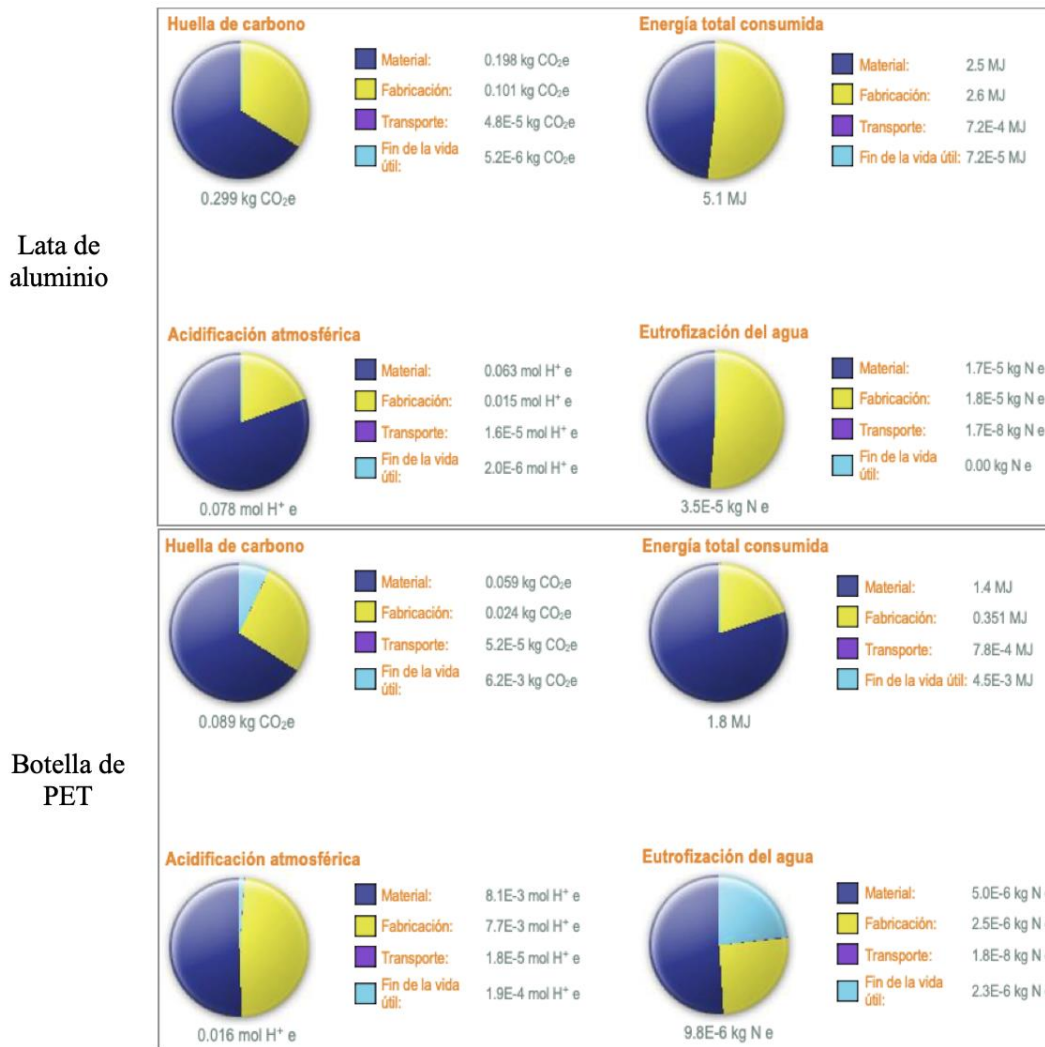


Fig. 9. Informe de sustentabilidad de envases en el caso de estudio IV (análisis inter-estatal).

CONCLUSIONES

Basado en una metodología científica establecida, nuestro estudio arroja resultados reveladores sobre el impacto ambiental de diferentes materiales de envasado de bebidas. Contrarios a la creencia popular de que el vidrio es el material más sostenible, nuestros hallazgos indican que el PET es el material que genera el menor impacto en todos los indicadores ambientales evaluados. En este contexto, el vidrio se destaca por ser el material que produce el mayor impacto en términos de huella de carbono, consumo de energía, acidificación del aire y eutrofización del agua. Le sigue el aluminio, el cual, pese a su versatilidad, requiere una cantidad significativamente mayor de energía en su proceso de producción, lo que resulta en una mayor huella de carbono en comparación con un polímero como el PET. El impacto ambiental asociado al vidrio durante su fabricación se debe principalmente a su alto punto de fusión y su masa, que son mayores en comparación con el aluminio y el PET. Esto implica que se necesita una cantidad considerablemente mayor de energía para reblandecer y procesar el vidrio. En cuanto a los impactos relacionados con la acidificación atmosférica y la eutrofización del agua, el vidrio también genera un mayor impacto debido a los procesos involucrados en su obtención, lo que significa que se genera una mayor contaminación en la producción, procesamiento y transporte del vidrio en comparación con el aluminio y el PET. Una de las conclusiones más destacadas de nuestro estudio es que, para los tres materiales analizados, los procesos de obtención del material son la etapa que genera el mayor impacto ambiental. Por lo tanto,

es esencial considerar estrategias de mejora en esta fase para implementar procesos productivos más sostenibles. En resumen, de acuerdo con los resultados obtenidos, concluimos que, en el contexto actual de la producción industrial de envases de bebidas carbonatadas, la botella de PET es la opción más sostenible.

Por otro lado, también es importante mencionar que existen otras variables de impacto ambiental relevantes que no fueron abordadas en esta investigación. Variables como la degradación del suelo y la utilización de recursos no renovables que también impactan en una evaluación integral de la sostenibilidad de los materiales de envasado. Sería beneficioso para futuras investigaciones incorporar estas variables para obtener una visión más completa de los impactos ambientales asociados con los distintos materiales.

REFERENCIAS

1. World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*, Report. Published as Annex to General Assembly document A/42/427, Development and International Co-operation: Environment, Agosto 2, 1987.
2. 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.
3. E. a. MARI. (2002). *La industria del vidrio y el medio ambiente: oportunidad y enfoque del Análisis del Ciclo de Vida*. Boletín De La Sociedad Española De Cerámica Y Vidrio, 41(4), 0366–3175.
4. International Standard Organization. (1997). ISO 14040:1997(E). Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
5. Hospido, A., & Rivela, B. (2022). *Perspectivas y reflexiones*. ResearchGate.
6. ¿Qué es la evaluación de ciclo de vida (LCA)? (s. f.). Solidworks. Recuperado 7 de septiembre de 2022, de https://www.solidworks.es/sustainability/sustainable-design-guide/2995_ESN_HTML.htm
7. Gobierno de México. (2014, 16 de julio). *La planta de reciclado PET más grande del mundo*. <https://www.gob.mx/epn/articulos/planta-de-pet-reciclado-grado-alimenticio-mas-grande-del-mundo#:~:text=En%20Toluca%2C%20hoy%20inaugur%C3%A9%20la,la%20salud%20de%20los%20mexicanos>.
8. Bravo, C. (Septiembre 2022). *Ergonomía y envases de vidrio*. De los métodos y las maneras, número 8, ISBN 978-607-28-1326-7.
9. Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (5a. ed.). México: Pearson Educación.
10. Arroyo Mayorga, Y. (2022). *Evaluación de la sustentabilidad de materiales para el envasado de refrescos utilizando solidworks sustainability*. [Tesis]. Repositorio Académico Digital, <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/25387>.
11. Brooks, D. W., & Giles, G. A. (Eds.). (2002). *PET packaging technology*. Sheffield Academic Press.
12. Sánchez, A. (2019, 12 de noviembre). *Vidrio, el residuo ‘olvidado’ en el proceso de reciclaje en México*. El Financiero. <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/vidrio-el-residuo-olvidado-en-el-proceso-de-reciclaje-en-mexico/>.
13. Cámara De Diputados. (2014). Boletín N°. 3469 En México, 90 millones de botellas de plástico de refrescos y agua son lanzados a la vía pública, ríos y mares. Recuperado 26 de diciembre de 2022, de <http://www5.diputados.gob.mx/index.php/esl/Comunicacion/Boletines/2017/Abril/13/3469-En-Mexico-90-millones-de-botellas-de-plastico-de-refrescos-y-agua-son-lanzados-a-la-via-publica-rios-y-mares>.
14. *Manufactura.mx*. Recuperado el 10 de noviembre de 2022, <https://manufactura.mx/industria/2018/04/11/arca-continental-la-fabrica-que-produce-la-famosa-coca-cola-mexicana>.

15. Celis, F. (2018, 15 de enero). La planta más grande de Coca-Cola Femsa está en México. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/asi-es-la-planta-mas-grande-de-coca-cola-femsa-en-mexico/>.
16. KOF. (2021, 17 de mayo). La economía circular de los empaques de Coca-Cola FEMSA. <https://coca-colafemsa.com/noticias/economia-circular-empaques-coca-cola-femsa/>.
17. Solís, A. (2018, 16 de mayo). Arca Continental ya le pisa los talones a Coca-Cola Femsa. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/arca-continental-ya-le-pisa-talones-a-coca-cola-femsa/>.