



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA
Y CAMBIO CLIMÁTICO

giz

Estudio de Análisis de Ciclo Vida (ACV) del manejo de envases de bebidas de polietilén tereftalato (PET) en la fase de pos-consumo



INDICE

1. Introducción.....	4
2. Justificación.....	5
3. Metodología.....	5
4. Definición de objetivos.....	6
4.1 Objetivo general.....	6
4.2 Objetivos específicos.....	6
5. Alcances del estudio.....	7
5.1 Límites del sistema.....	7
5.2 Unidad funcional.....	9
5.3 Escenarios a evaluar.....	9
5.4 Procedimientos de asignación.....	13
6. Metodología de la EICV y tipos de impactos a evaluar.....	13
6.1 Requisitos relativos a los datos.....	16
6.2 Suposiciones.....	16
7. Datos para Inventarios de Ciclo de Vida (ICV).....	17
7.1 Consulta de referencias.....	17
7.2 Consulta con actores involucrados.....	17
7.3 Definición del Flujo de materiales.....	19
7.4 Estimación cuantitativa del flujo de materiales.....	21
7.5 Datos del sistema de manejo de RSU en México.....	21
7.6 Datos del sistema de producción y reciclaje de PET en México.....	26
8. Metodología para la recopilación de Inventarios de Ciclo de Vida (ICV).....	30
8.1 Herramienta para recopilación de ICV con datos mexicanos.....	30
8.2 Conformación de ICV.....	31
9. Resultados de la Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV).....	35
9.1 Evaluación del actual sistema de manejo de PET pos-consumo en México.....	35
9.2 Evaluación de escenarios con incremento de acopio-reciclaje.....	42
9.2.1 Cambio climático.....	42
9.3.2 Agotamiento de recursos abióticos.....	43
9.3.3 Agotamiento de la capa de ozono.....	43
9.3.4 Eco toxicidad.....	44
9.3.5 Eutrofización.....	45
9.3.6 Acidificación.....	45
10. Interpretación del ACV.....	47
11. Observaciones de la Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV).....	48
12. Conclusiones de la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV).....	49
Agradecimientos.....	51
Referencias.....	52
Anexo 1 Formato de recopilación de inventario, Hoja 1.....	55
Anexo 2 Formato de recopilación de inventario, Hoja 2.....	56
Anexo 3 Categorías de impacto.....	57



Participaron en la elaboración de este estudio:

**INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO (INECC)**

M. en I. Guillermo Encarnación Aguilar

I.Q. Alejandra Joy Campos Rivera

I.Q. Ana Paulina Avila Forcada

COOPERACIÓN ALEMANA AL DESARROLLO (GIZ)

Sören Bjön Rüd

Sergio Flores Martínez

1. Introducción

Los envases para bebidas de Polietilen tereftalato (PET) ofrecen al mercado ventajas funcionales como resistencia, ligereza y posibilidades de distribución en masa de refrescos, aguas carbonatadas y aguas embotelladas que han sido muy bien recibidas por el sector consumidor que, en el caso particular de los refrescos en México, ocupa los primeros lugares de consumo a nivel mundial (consumo per cápita promedio de 431 ml/día) en sus diversas presentaciones, tamaños y materiales de empaque (PET, vidrio y aluminio). La participación porcentual de los envases PET no retornables en el mercado es muy significativa (65.8 %) seguido de los envases de vidrio (11.9 %) y de aluminio (6.6 %). (ANPRAC, 2008). En este contexto, la resina PET virgen se coloca como una de las resinas plásticas que más se está desarrollando en el país con una tasa de crecimiento anual nmpromedio de 3.3% en el periodo 2010-2011 (ANIPAC, *Anuario Estadístico 2012*).

Los envases de bebidas de PET se presentan como la fracción de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) de los envases y embalajes plásticos que han presentado el mayor crecimiento en los últimos 15 años, cuadruplicando su porcentaje en peso en la mezcla de los RSU a diferencia del papel o el vidrio que duplicaron su volumen de generación (SINGIR, 2012). Se estima que los envases PET que entran al sistema de Manejo de RSU del Distrito Federal (D.F.) es cercano al 3.0%; en el caso del Interior de la República (I.R.) el porcentaje promedio de envases de bebidas PET pos-consumo en el sistema de manejo de RSU se estima entre el 1.0 y 2.0% dependiendo de la región.

Bajo el escenario planteado, un manejo inadecuado de los residuos de envases de PET puede presentar impactos ambientales a los ecosistemas urbanos, rurales y naturales; contaminación visual, problemas en el funcionamiento de servicios públicos, etc. Por otro lado, la fracción de PET canalizada al sistema de recolección de residuos contribuye a incrementar los impactos ambientales debido a los consumos materiales y energéticos derivados de los procesos de recolección, acondicionamiento, tratamiento y disposición final. En el caso de los esquemas de aprovechamiento del PET es necesaria la evaluación de las diversas tecnologías de reciclaje que operan en el mercado, las estrategias de acopio y acondicionamiento y los requerimientos de transporte para el reciclaje nacional y en el extranjero. Finalmente, los esquemas de consumo en masa de los envases no retornables (desechables) se relaciona directamente al empleo ineficiente de recursos naturales (recursos petroquímicos no renovables en el caso del PET) que al no ser manejados adecuadamente por los sistemas de producción, consumo y disposición final representan un desperdicio de recursos aprovechables y energía recuperable.

Ante esta situación, cabe destacar la iniciativa del sector privado en México que a través de la asociación ambientalista Ecología y Compromiso Empresarial (ECOCE) creada en 2002, un grupo de empresas del ramo de las bebidas y alimentos han asumido el compromiso de colaborar al manejo de RSU mediante el Primer Plan Nacional Voluntario de Manejo de los residuos de envases de bebidas PET pos-consumo, tomando acciones para la recuperación y reciclaje de PET; así como el desarrollo de campañas y programas de educación ambiental, entre otras.

2. Justificación

Dados los altos volúmenes de generación y disposición final de envases de bebidas de PET en México, es evidente la necesidad de evaluar en términos ambientales los diferentes esquemas de producción, consumo, las tecnologías de reciclaje y manejo de residuos de los envases de bebidas de PET. En este sentido, la generación de información científica es necesaria para validar las decisiones y medidas pertinentes a tomar por los sectores gubernamental e industrial para asegurar que los envases de bebidas de PET tengan un desempeño eficiente en los sistemas tecnológico y económico, así como los menores impactos negativos a la sociedad y el medio ambiente.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se posiciona como una herramienta clave para la evaluación de potenciales impactos ambientales, así como para la generación de información científico-técnica útil para la orientación de la política y legislación ambiental; el establecimiento y fortalecimiento de programas de gestión integral de residuos y planes de manejo entre otros instrumentos de política, así como la toma de decisiones de los tres órdenes de gobierno así como los sectores industrial y social.

En este sentido, el presente “Estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del manejo de envases de bebidas de Polietileno tereftalato (PET) en la fase de pos-consumo” se alinea con el objeto de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) en cuanto que es un elemento para el fortalecimiento de la instrumentación de estrategias para la gestión integral de residuos con miras al alcance de los objetivos planteados para el desarrollo sustentable con enfoque en la prevención de la generación y valorización de residuos bajo criterios de eficiencia ambiental y tecnológica.

3. Metodología

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se presenta como una metodología sistémica para la cuantificación de impactos ambientales de sistemas, procesos, servicios y productos, mediante la elaboración de inventarios de los insumos materiales y energéticos, así como las emisiones y residuos involucrados en todas las etapas de ciclo de vida.

El presente estudio de ACV se realizó siguiendo la metodología estandarizada por la Organización Internacional de Estándares (ISO Serie 14040) y sus correspondientes normas mexicanas *NMX-SAA-14040-IMNC- 2008* Gestión ambiental - Análisis de Ciclo de Vida- Principios y marco de referencia y *NMX-SAA-14044-IMNC-2008* Gestión ambiental - Análisis de Ciclo de Vida-Requisitos y directrices. El desarrollo técnico se llevó a cabo con la colaboración de la Cooperación Alemana al Desarrollo (GIZ) y el apoyo técnico del Instituto de Investigación en Energía y Medio Ambiente de Heidelberg, Alemania (IFEU).

La modelación del flujo de materiales y los cálculos de impactos ambientales se realizaron mediante el software Umberto®. En la integración de los Inventarios de Ciclo de Vida (ICV) se emplearon bases de datos internacionales: Ecoinvent y National Renewable Energy Laboratory (NREL); y datos nacionales recopilados mediante la elaboración y difusión de herramientas de acopio de información (cuadros de datos y cuestionarios) con

actores clave en el ciclo de vida de los envases de bebidas de PET. En la definición del flujo de materiales se trabajó dos líneas prioritarias: la consulta directa con los actores involucrados en cada etapa del ciclo de vida de los envases para bebidas de PET, y la consulta de referencias de medios electrónicos e impresos.

A partir de los objetivos establecidos en el estudio se definieron escenarios comparativos orientados a evaluar la situación actual del manejo de los envases de PET (recolección, transferencia, plantas de separación y recuperación (pre pepena y pepena) con respecto a algunas alternativas de aprovechamiento y considerando vías de acopio, tipo de reciclaje (rPET grado amorfo y grado botella uso alimenticio), así como el lugar de reciclaje (nacional e internacional) y el consumo energético para transportes.

La metodología consistió en la evaluación del escenario actual de reciclaje PET en México (*Esc_Base*) con respecto a un escenario donde no existe separación, acopio ni reciclaje (*Esc_0*), para determinar las ventajas ambientales del actual esquema en México; así mismo se hizo una evaluación de los impactos bajo el supuesto de que el actual volumen de PET acopiado fuera reciclado en el país (*Esc_Rec_Nal*). Posteriormente se evalúan los cuatro escenarios planteados incrementando el acopio de envases de bebidas de PET pos-consumo en sus dos versiones (*Esc_V1*, *Esc_V2*) y sus variantes de reciclaje nacional/extranjero y 100% reciclaje nacional (*Esc_V1_Nal*, *Esc_V2_Nal*) con respecto al escenario actual (*Esc_Base*).

4. Definición de objetivos

Los objetivos para el “Estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del manejo de envases de bebidas de polietileno tereftalato (PET) en la fase pos-consumo” son:

4.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño ambiental de diferentes escenarios de manejo de envases de bebidas de PET pos-consumo en México con referencia al escenario actual, que permita establecer las bases para la toma de decisiones de política ambiental orientadas a mejorar la valorización de esta corriente de materiales.

4.2 Objetivos específicos

- Desarrollar los inventarios de ciclo de vida de las botellas PET pos-consumo mediante la definición de diferentes estrategias de consulta y obtención de información.
- Definición de la metodología de impactos ambientales acorde los intereses definidos en la política nacional.
- Cuantificación y análisis de resultados que permitan establecer bases que ayuden al establecimiento de la política pública que favorezca un mejor desempeño ambiental.

5. Alcances del estudio

El estudio de ACV se enfoca al análisis de escenarios en la etapa pos-consumo de los envases de bebidas de PET no retornables producidos, consumidos y generados como residuos en México durante el año base 2011. Se hace énfasis en la fase final de la vida útil de los envases de bebidas de PET o fase de pos-consumo; sin embargo, se incluye la producción de resina PET virgen para el cálculo de los beneficios ambientales del reciclaje por sustitución de resina PET reciclada (rPET) en un sistema productivo basado en materias primas vírgenes.

El sistema bajo estudio evalúa diferentes esquemas de reciclaje nacional y en el extranjero en términos de potenciales impactos ambientales, sin considerar aspectos económicos, políticos o sociales. En este sentido, el presente estudio es una herramienta para el sector gubernamental que aporta bases técnicas en términos ambientales y que puede ser usado en conjunción con otros instrumentos de carácter transversal como lo es el estudio *“Diagnóstico de la situación actual y análisis de factibilidad de posibles instrumentos económicos para envases de PET pos-consumo en México”* (INE- GIZ, 2012).

Los resultados obtenidos serán socializados con el área de Gestión ambiental del Gobierno Federal a través de la SEMARNAT; y el sector industrial, ya que tuvo una participación importante en la aportación de información vía ANIPAC y ECOCE; y estarán disponibles para divulgación pública a los sectores interesados en la página electrónica del INECC.

5.1 Límites del sistema

El sistema a modelar se enfoca al esquema de manejo de los envases para bebidas de PET en su fase pos-consumo, y se conformó por 2 subsistemas orientados al manejo: 1) manejo de RSU; 2) acopio y reciclaje de PET pos-consumo, y un subsistema que describe los beneficios ambientales del reciclaje: 3) producción de la resina PET virgen (Ver Fig. 1):

1. **Manejo de los envases de bebidas de PET en RSU.** El subsistema contempla las etapas principales del manejo de RSU en México, desde la generación de residuos de envases para bebidas PET (botellas PET pos-consumo con tapa y etiqueta) que entran al servicio de recolección, transferencia, actividades de pre pepena en el sistema de recolección, pepena y la disposición final en relleno sanitario, incluyendo todos los procesos de transporte relacionados.
2. **Acopio y reciclaje de envases de bebidas de PET en su fase pos-consumo.** Considerando las actividades de separación en la fuente de los programas de separación, que para el presente incluyen los planes de manejo y programas de acopio de la iniciativa privada, gobiernos municipales y ONG; las actividades de acopio, acondicionamiento para su reciclaje; los procesos de reciclaje de PET grado amorfo y grado botella uso alimenticio, así como todos los procesos de transporte relacionados.

3. **Producción de resina PET grado amorfo y grado botella uso alimenticio en base a materias primas vírgenes.** Considera desde la extracción del petróleo para la producción de las materias primas utilizadas en la fabricación de la resina de Polietilén tereftalato: Acido tereftálico (TPA) y Etilenglicol (EG), hasta las etapas de refinación, fraccionamiento y extracción de la industria petroquímica para la producción de la resina grado amorfo y grado botella uso alimenticio, así como todos los procesos de transporte involucrados.

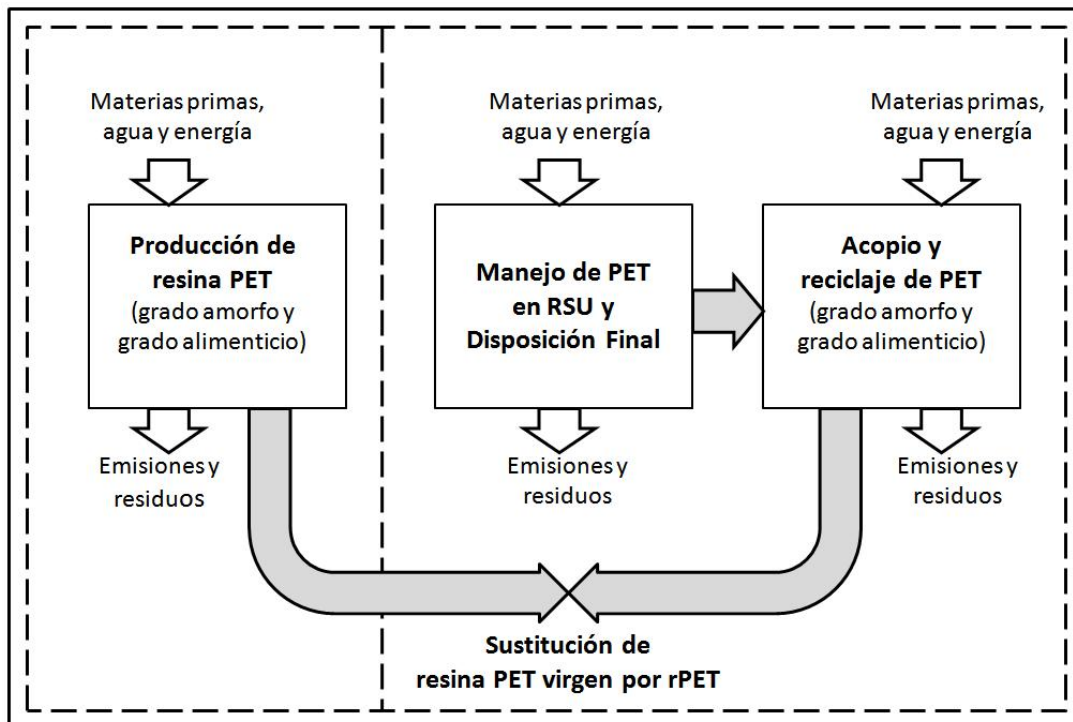


Fig. 1 Límites del sistema

Se encuentran fuera de los límites del sistema del estudio lo siguiente:

- Los envases de PET del tipo retornable, los envases de PET no retornables utilizados en el envasado de aceite comestible, productos de limpieza, productos de belleza y otros productos alimenticios del tipo de encurtidos, mermeladas, etc.
- Para el estudio no se consideran las fracciones de envases PET de importación.

Así mismo, de acuerdo a los objetivos definidos del estudio no se considera lo siguiente:

- Los procesos de producción de preforma y botella para los envases grado alimenticio y no alimenticio, así como los procesos de embotellado y distribución de bebidas en envases de PET.
- Los procesos y materiales relacionados con la producción de la tapa rosca y etiqueta que conforman el envase de bebidas de PET como producto terminado.

En la definición de los límites del sistema a modelar se tomaron en cuenta las aportaciones realizadas en el *panel de actores involucrados* (véase sección 7.2), donde se acordó incluir el reciclaje de los envases para bebidas PET en resina PET grado amorfo (usos en fibras, láminas y botellas grado no alimenticio), además de la resina PET para botella grado alimenticio, con la finalidad de hacer más representativo el sistema a evaluar respecto a la realidad mexicana.

Por otro lado, el sistema modelado supone la disposición final de los envases para bebidas de PET en un relleno sanitario, sin considerar los sitios controlados y tiraderos a cielo abierto. Así mismo, para fines de investigación y de interés nacional sobre la emisión de GEI que contribuyen al cambio climático en sitios de disposición final, se han realizado ajustes al modelo que consideran la potencial quema de una fracción de PET pos-consumo en el sitio.

5.2 Unidad funcional

La unidad funcional del ACV se definió como el manejo de 715 167 ton de envases de bebidas de PET pos-consumo (véase Tabla 7), que corresponden a la cantidad de envases PET producto terminado (con tapa y etiqueta) en el mercado mexicano para el año 2011, esto es 613 000 ton de envases para bebidas de PET grado alimenticio (ECOCE, 2011).

5.3 Escenarios a evaluar

Para el presente estudio se definieron 7 escenarios a modelar con objeto de evaluar los impactos ambientales evitados por los actuales esquemas de acopio y reciclaje de los envases de bebidas de PET en México, así como la evaluación de las alternativas de incremento de acopio considerando las opciones de aumento de la eficiencia de separación en el sistema de recolección (actividades de pre pepena durante la recolección, pepena en el sitio de disposición final y plantas de separación) y por el aumento de la separación en la fuente a través de programas de separación y planes de manejo. Se evalúa a su vez la canalización a reciclaje nacional de la totalidad de los envases para bebidas de PET acopiados para determinar los impactos ambientales ocasionados por los procesos de exportación para reciclaje en el extranjero.

A continuación se presentan a detalle los escenarios definidos:

1. **Escenario base** (*Esc_Base*); modelo del escenario actual de manejo de los envases para bebidas de PET pos-consumo en México con datos base 2010-2012, véase Fig. 2.

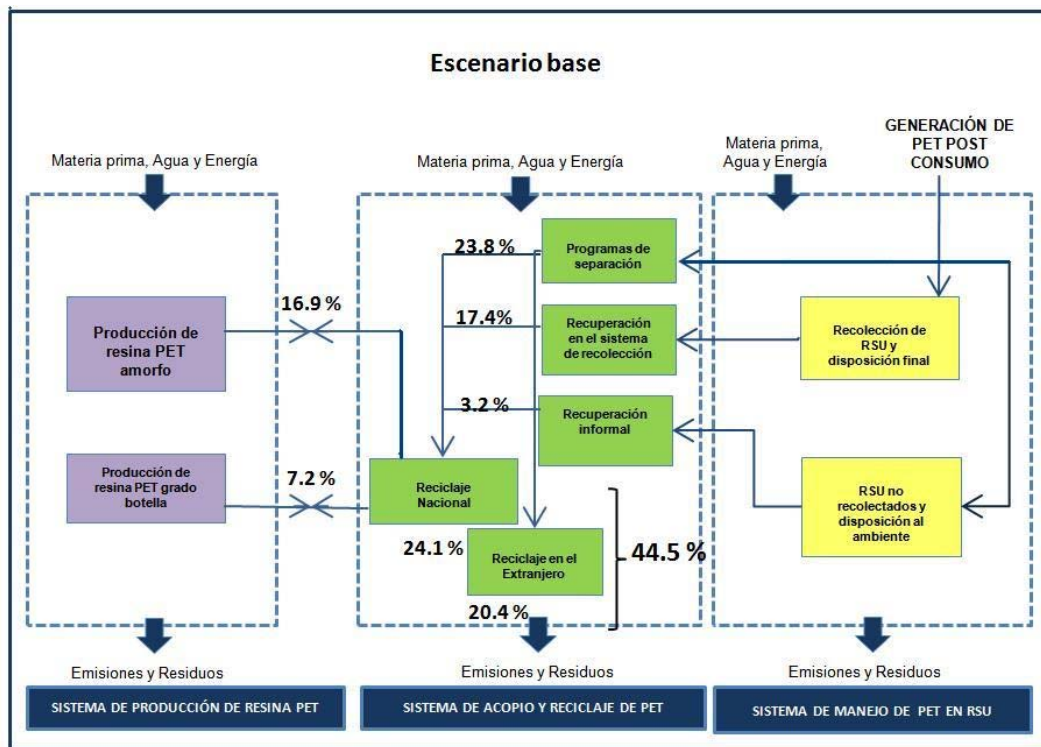


Fig. 2 Escenario base

2. **Escenario cero** (*Esc_0*); modelo del escenario de disposición final sin esquemas de valorización para los envases para bebidas de PET, véase Fig. 3.

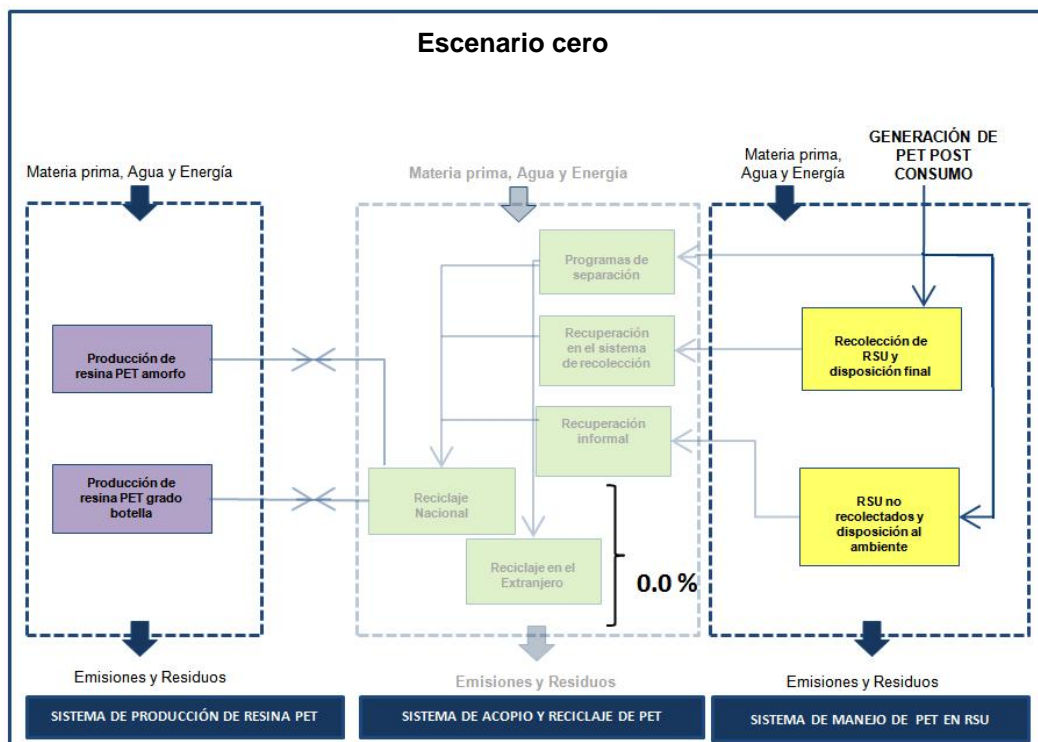


Fig. 3 Escenario cero

3. **Escenario base con reciclaje nacional (*Esc_Rec_Nal*);** modelo del escenario base que supone todos los envases para bebidas de PET acopiados canalizados a reciclaje nacional, véase Fig. 4.

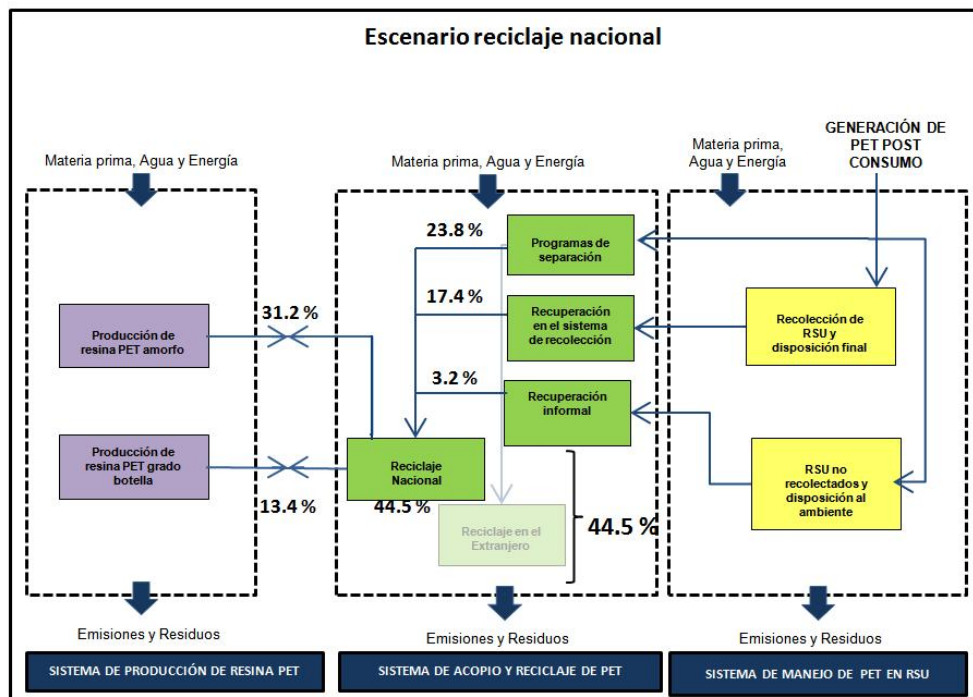


Fig. 4 Escenario base con reciclaje nacional

4. **Escenario de incremento de reciclaje versión 1, (*Esc_Inc_V1*);** modelo del escenario donde se define un incremento del reciclaje de un 37% con respecto al volumen acopiado en el escenario actual. Se considera un incremento de acopio para reciclaje debido al aumento simultáneo de la eficiencia de separación en el sistema de manejo de residuos y los programas de separación. Se establece además una disposición al ambiente fija del 1%, véase Fig. 5.

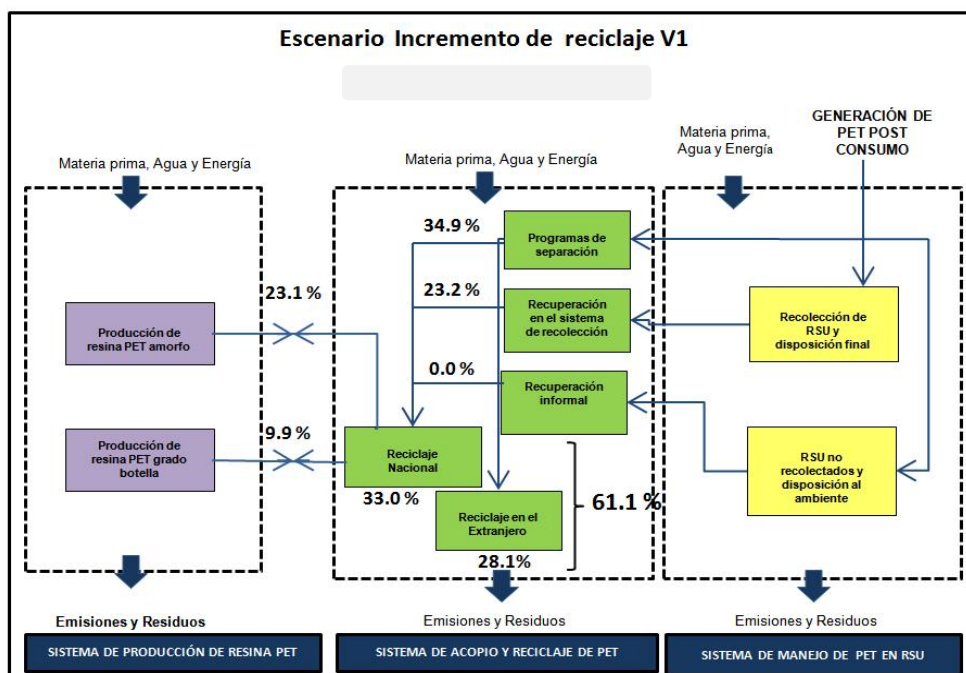


Fig. 5 Escenario de incremento de reciclaje versión 1

5. **Escenario de incremento de reciclaje vía nacional versión 1, (Esc_Inc_Nal_V1);** modelo del escenario que presenta un incremento del reciclaje de un 37% sobre el total acopiado en el escenario actual, considerando el mejoramiento de la eficiencia del sistema de manejo y los programas de separación; bajo la suposición que todo el material PET acopiado es canalizado a reciclaje nacional, véase Fig. 6.

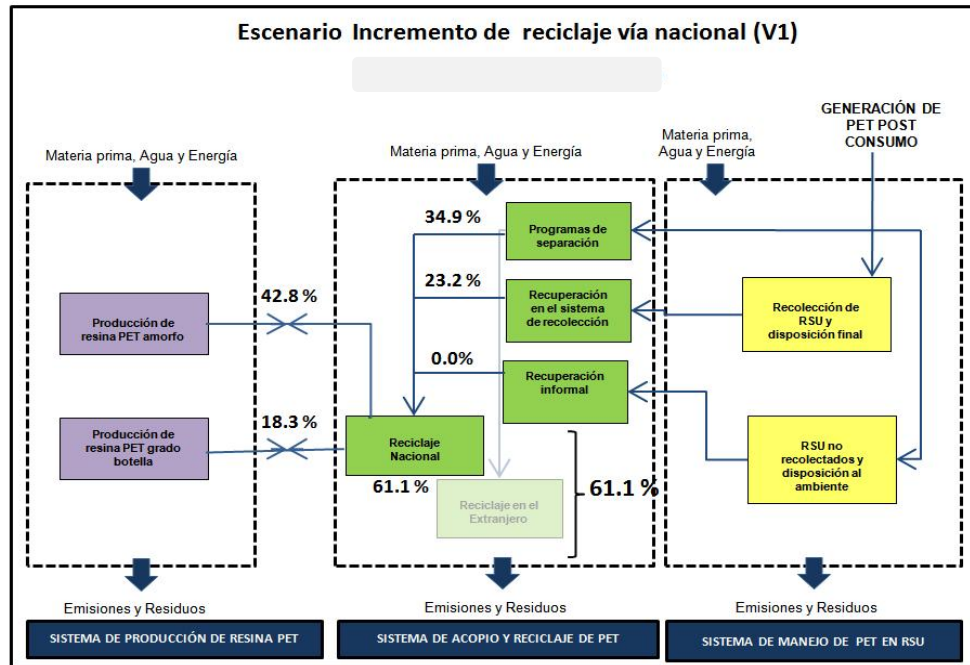


Fig. 6 Escenario de incremento de reciclaje vía nacional versión 1

6. **Escenario de incremento de reciclaje versión 2, (Esc_Inc_V2);** modelo del escenario con incremento de reciclaje de un 37% con respecto al volumen total acopiado en el escenario actual. Se considera el incremento del acopio para reciclaje debido al aumento de la eficiencia en los programas de separación, véase Fig. 7.

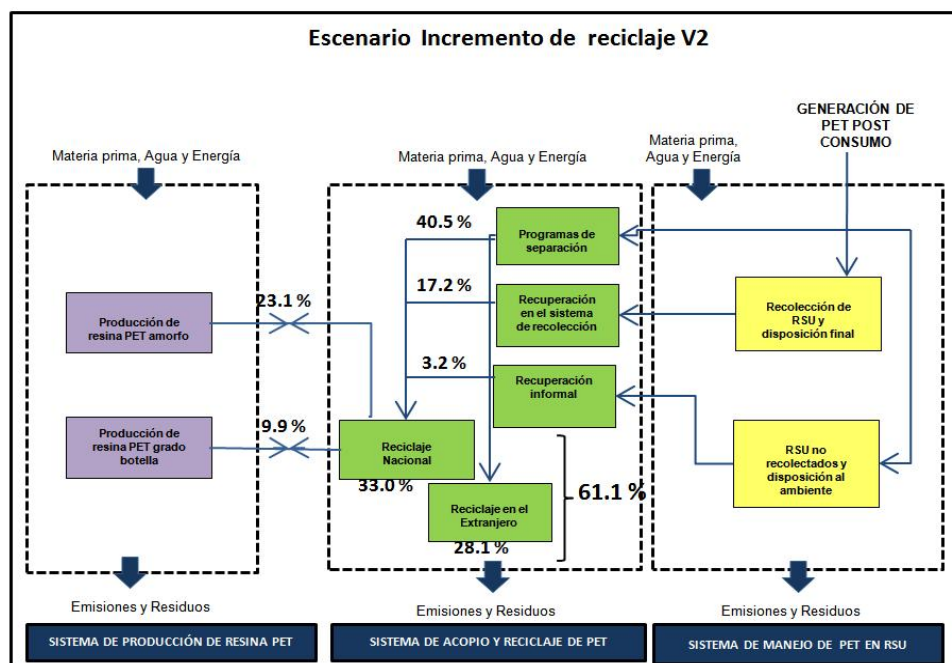


Fig. 7 Escenario de incremento de reciclaje versión 2

7. **Escenario de incremento de reciclaje vía nacional versión 2, (Esc_Inc_Nal_V2);** modelo del escenario con incremento de reciclaje del 37% del volumen total acopiado por aumento de la eficiencia de los programas de separación; bajo la suposición que todo el material PET acopiado es canalizado a reciclaje nacional, véase Fig. 8.

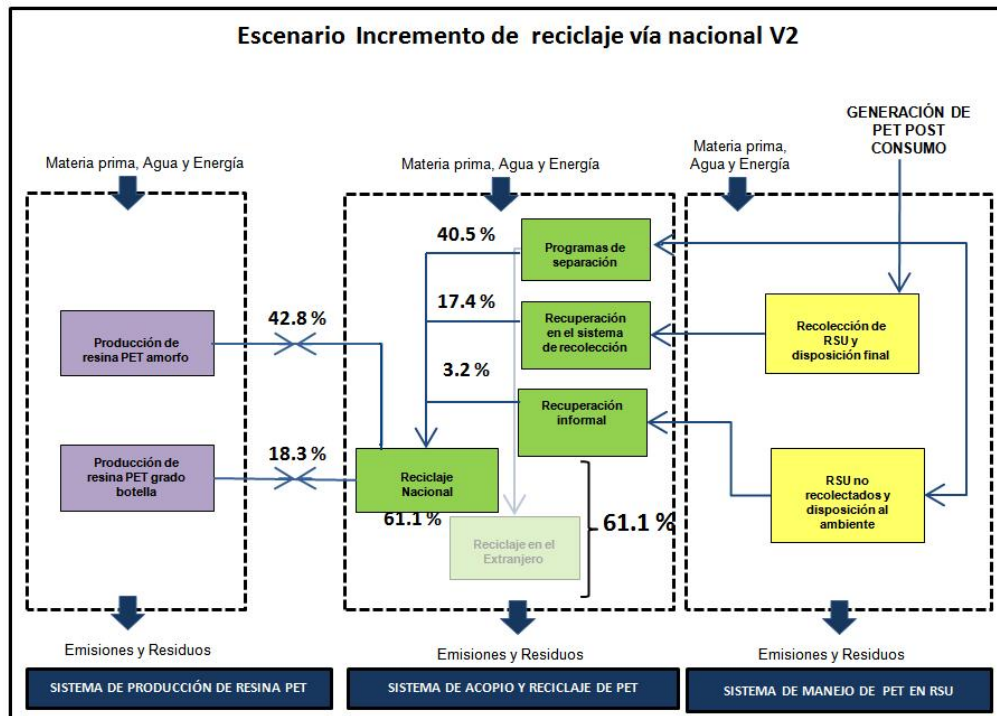


Fig. 8 Escenario incremento de reciclaje vía nacional, versión 2

5.4 Procedimientos de asignación

En el presente estudio se realiza el procedimiento de asignación en base a la **masa** entrante a todos los procesos, así como las entradas significativas de **energía** correspondientes a los sistemas productivos, sistemas de transporte y combustibles.

6. Metodología de la EICV y tipos de impactos a evaluar

La metodología de evaluación de impactos ambientales (EICV) para este estudio de ACV es la CML 2001 (Center of Environmental Science of Leiden University), que es un método de categorías de impacto intermedias para calcular resultados mediante la asignación de factores de caracterización a los flujos elementales de las entradas y salidas de los inventarios.

La selección de las categorías de impacto se realizó considerando las líneas relevantes de la problemática ambiental relacionadas al sector de la industria de plásticos en México y, en apego con los objetivos y alcances definidos para el estudio, de manera que resultan dentro de las categorías de impacto más relevantes: el cambio climático,

agotamiento de los recursos abióticos, agotamiento de la capa de ozono, la eco toxicidad en agua, eutrofización y acidificación. Las categorías de impacto evaluadas se describen brevemente a continuación, el listado los modelos y factores de caracterización así como las unidades correspondientes a cada categoría de impacto seleccionada se listan en el Anexo 4.

Cambio climático

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) principalmente bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozono (O_3) y el vapor de agua; provocan cambios en la composición de la atmósfera terrestre alterando el flujo natural de radiación infrarroja absorbida por la superficie lo cual provoca el incremento en la temperatura del planeta ó calentamiento global. El factor de caracterización para las emisiones de GEI en el ACV se basa en el grado en el que un gas emitido produce cambios en la emisión y reemisión energética en la atmosfera, es decir, su potencial de calentamiento global (GWP), de donde el factor de caracterización es para un horizonte de tiempo de 100 años. El GWP está en función de la absorción de radiación infrarroja y concentración del GEI con respecto a la absorción causada por 1 kg de CO_2 , y se expresa en unidades de CO_2 equivalentes para diferentes horizontes de tiempo.

Agotamiento de recursos abióticos

Los recursos abióticos son recursos naturales no renovables. Éstos son los minerales, metales, petróleo y gas natural que se usan como materias primas y fuentes energéticas en las actividades antropogénicas, y que al ser sobreexplotados pueden llegar al agotamiento. En el ACV la categoría de impacto de agotamiento de recursos se define según la percepción y las expectativas del usuario, los objetivos y alcance planteados, así como la información disponible para fundamentar el factor de caracterización; por lo que existen modelos de caracterización muy variados. En la metodología CML el indicador de categoría se enfoca al uso de recursos y considera el tamaño de la reserva así como los índices de extracción. Cada recurso del inventario ó insumo se compara contra un recurso de referencia. El factor de caracterización para la categoría de agotamiento de recursos abióticos para este estudio está definido como potencial de agotamiento abiótico (ADP) y se define en base a las últimas reservas mundiales del antimonio; metal que en el proceso de extracción metalúrgica se asocia al plomo, zinc, oro, arsénico, mercurio, wolframio y al cobre. El ADP se expresa en unidades equivalentes del antimonio ($\text{Sb kg}_{\text{eq}}/\text{MJ}$).

Agotamiento de la capa de ozono

La emisión de sustancias químicas a la atmósfera como los clorofluorocarbonos (CFC's), afectan el balance de las reacciones químicas que mantienen la capa de ozono estratosférico. Estas sustancias actúan como catalizadores incrementando el índice de destrucción del ozono por la absorción de radiación UV y visible. Dada la complejidad de la química del ozono, se han desarrollado modelos teóricos para calcular el potencial de agotamiento de ozono (ODP) para cada sustancia emitida a la atmósfera. La caracterización del agotamiento de la capa de ozono para el ACV se lleva a cabo mediante el factor ODP que refleja el cambio en la columna de ozono estratosférico debido a la emisión de una sustancia, se expresa en relación al cambio producido por el CFC-11. Las listas de ODP para diferentes sustancias son desarrolladas por la

Organización Meteorológica Internacional (WMO), éstas son ampliadas y actualizadas periódicamente.

Eco toxicidad

La emisión al ambiente de compuestos derivados de las actividades antropogénicas puede tener efectos tóxicos al mismo. Los criterios más importantes para caracterizar la eco toxicidad son el destino, exposición y efectos asociados a las sustancias. Existen una gran variedad de modelos desarrollados, los cuáles se diferencian principalmente por las consideraciones sobre el efecto y sus dimensiones en el ambiente; el modelo usado para este estudio es el USES 2.0 (The Uniform System for the Evaluation of Substances) que utiliza datos empíricos toxicológicos estándar para elaborar indicadores de toxicidad para cerca de 200 sustancias y prever su respuesta ambiental. El modelo combina la escala regional, continental y global con las temperaturas geográficas y las propiedades físico químicas de una sustancia para describir su dispersión en el suelo, agua ó aire; y calcular la concentración ambiental potencial (PEC) que se relaciona con la concentración prevista de no afectación (PNEC) para estimar un índice de impacto, que se relaciona al de la sustancia de referencia 1,4- diclorobenceno. El factor de caracterización ó potencial de eco toxicidad de la sustancia es expresado en kg (1,4-DCB equivalentes).

Eutrofización

El aumento gradual en cuerpos de agua de la concentración de sustancias como fosfatos y nitratos derivados de actividades antropogénicas estimula la productividad biológica de ciertas especies vegetales acuáticas teniendo como efecto la disminución del oxígeno disuelto en agua con efectos adversos en los ecosistemas acuáticos. Esta categoría de eutrofización se modela asumiendo el máximo efecto eutrofizante de una sustancia considerando todos los nutrientes (emitidos al aire y al agua) que eventualmente terminan en los sistemas acuáticos, es expresado por el potencial de eutrofización (EP), sin embargo la mayor parte de los modelos desestiman las variación en la eutrofización por la componente geográfica debido a la complejidad del mecanismo. El cálculo del EP se basa en el balance estequiométrico de nitrógeno, fosforo, carbono y oxígeno para formación y descomposición de la biomasa acuática promedio ($C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$) y, la demanda química de oxígeno (DQO) referida a la contaminación por materia orgánica.

Acidificación

La emisión de compuestos contaminantes a la atmósfera como son los gases de SO_2 , NO_x y NH_3 provocan un efecto de acidificación del ambiente a través de un proceso conocido como deposición ácida. Estos compuestos son disueltos en agua ó superficies húmedas formando ácidos que al ser depositados en el ambiente a través de la lluvia, neblina ó nieve disminuyen el pH original afectando tierra, agua, flora y fauna. La acidificación es la pérdida de la capacidad natural de neutralización del suelo y agua, como consecuencia de la adición de compuestos ácidos, tales como ácido sulfúrico y nítrico. El potencial de acidificación (AP) de una sustancia se determina por su capacidad de formación de iones hidronio $[H^+]$ y refleja la acidificación máxima que una

sustancia puede ocasionar en el ambiente. El AP se expresa como el número de iones H^+ producidos por kg de sustancia en relación a los producidos por el SO_2 .

6.1 Requisitos relativos a los datos

Los datos empleados en este estudio comprenden información recopilada en fuentes primarias asociadas a los procesos de los tres sistemas definidos (instituciones, asociaciones y empresas), así como datos calculados o estimados a partir de información y referencias nacionales, así como bases de datos internacionales.

Los datos cuantitativos del diagrama de flujo se conformó con información del período 2010-2012 para el sistema de manejo de residuos en México; para el caso del sector industrial de la producción y reciclaje de envases de bebidas de PET pos-consumo se emplearon datos año base 2011.

El área geográfica de recopilación de información comprende la República Mexicana con enfoque en casos especiales a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) y el D.F. según se indique el caso.

6.2 Suposiciones

Para este estudio se establecieron las siguientes suposiciones:

- 1) Se considera para el modelo de manejo de RSU que el PET pos-consumo recolectado se dispone en un relleno sanitario. Sin embargo, el sistema de manejo de RSU en México presenta 3 tipos de sitios de disposición final: tiraderos a cielo abierto, sitios controlados de disposición final y relleno sanitario. Se aplica al modelo una corrección por quema a cielo abierto que aplica una consideración del 10% de quema en el sitio de disposición final (2 kg de CO_2 eq./ton de material PET pos-consumo dispuesto) para hacerlo más representativo a la realidad mexicana.
- 2) Para el cálculo de los procesos de transporte correspondientes al sistema de manejo de RSU se consideraron las distancias promedio características de la ZMVM.
- 3) Los procesos de reciclaje B-F, B-L y B-B (grado no alimenticio) se consideraron como datos agregados de reciclaje correspondiente al reciclaje de PET amorfo.
- 4) Se considera que el acondicionamiento del PET recuperado para reciclaje nacional y para reciclaje en el extranjero es el mismo en todos los casos, y consiste en un proceso de compactación en pacas. Los procesos de trituración y lavado se incluyen en los procesos de reciclaje.
- 5) Se considera que todo el PET canalizado a reciclaje al extranjero se recicla en China vía la región Asia-pacífico, de esta forma, cerca del 80% del PET exportado en México se envía directamente a la región Asia-Pacífico; y el 20% restante se envía vía Estados Unidos a la misma región. De dónde el 45% es reciclado en China.

7. Datos para Inventarios de Ciclo de Vida (ICV)

La obtención de información fue un proceso interactivo que consistió primeramente en la elaboración del diagrama de flujo típico para el sistema de manejo de los envases de bebidas de PET pos-consumo en México; la identificación de los procesos clave y; la definición de los flujos de PET, como se describirá más adelante. Por otro lado, y una vez identificados los procesos, se conformaron los inventarios de ciclo de vida (ICV) del sistema bajo estudio.

La recopilación de la información necesaria requirió la realización de una consulta bibliográfica para el establecimiento del marco de referencia, así mismo, se llevó a cabo de forma conjunta y simultánea la consulta directa con los actores involucrados en las diferentes etapas del ciclo de vida de los envases para bebidas de PET.

7.1 Consulta de referencias

La consulta de referencias consistió en una revisión en medios electrónicos, impresos, presentaciones Power Point, publicaciones, normas y guías para el desarrollo de ACV, y referencias nacionales e internacionales. La información obtenida se analizó, procesó y se empleó en el desarrollo del *diagrama de flujo de materiales* para definir los sistemas de manejo de residuos; acopio y reciclaje de PET pos-consumo y producción de resina PET virgen.

Para el desarrollo de los inventarios de los procesos involucrados en la etapas de ciclo de vida de los envases para bebidas de PET se consideraron las bases de datos ya existentes a nivel internacional para procesos similares, así como la información, datos generados y disponibles en el país para cada una de las etapas a evaluar.

7.2 Consulta con actores involucrados

La identificación, consulta y retroalimentación de los actores relacionados con las etapas del ciclo de vida de los envases de bebidas de PET pos-consumo estuvo orientada inicialmente a los procesos de producción de resina PET, productores de preforma y botella, embotelladoras, acopiadores, empresas recicladoras, asociaciones relacionadas con la industria química del plástico, refrescos, aguas carbonatadas y no carbonatadas, municipalidades responsables del manejo integral de los residuos y prestadores de servicios relacionados con el PET, así como el sector gubernamental relacionado con el manejo integral de residuos.

La fase de contacto y acercamiento con los actores requirió de una solicitud formal, así como de reuniones donde se presentaron los objetivos y alcances del proyecto así como los requerimientos de información. En este contexto, se organizó el *Primer Panel Informativo de Actores involucrados en el Ciclo de Vida de los Envases de Bebidas de PET*, para el que se convocó a las asociaciones y representantes del sector industrial relacionados con la producción y reciclaje de envases para bebidas de PET grado alimenticio y no alimenticio. Se contó con la participación de la “Asociación para Promover

el Reciclado del PET” (APREPET), ECOCE, la “Asociación Nacional de la Industria Química” (ANIQ), la “Asociación Mexicana de Envases y Embalajes” (AMEE), ALPLA, la “Asociación Nacional de Productores de Refrescos y Aguas Carbonatadas A.C.” (ANPRAC), Empaque Sustentable Coca Cola de México, la “Asociación de Embotelladoras mexicanas de Coca Cola A.C.” (ASCOCA), IMER, PETSTAR, ANIPAC, Petróleos Mexicanos (PEMEX) y consultores independientes.

En la recopilación de inventarios mexicanos de los procesos de reciclaje se identificaron industrias representativas del sector de acopio y reciclaje de los envases de bebidas de PET pos-consumo a través de la información proporcionada por la ANIQ, APREPET y la AMEE; lo cual permitió tener un acercamiento clave con las principales empresas de recicladores en México (Fig. 9).

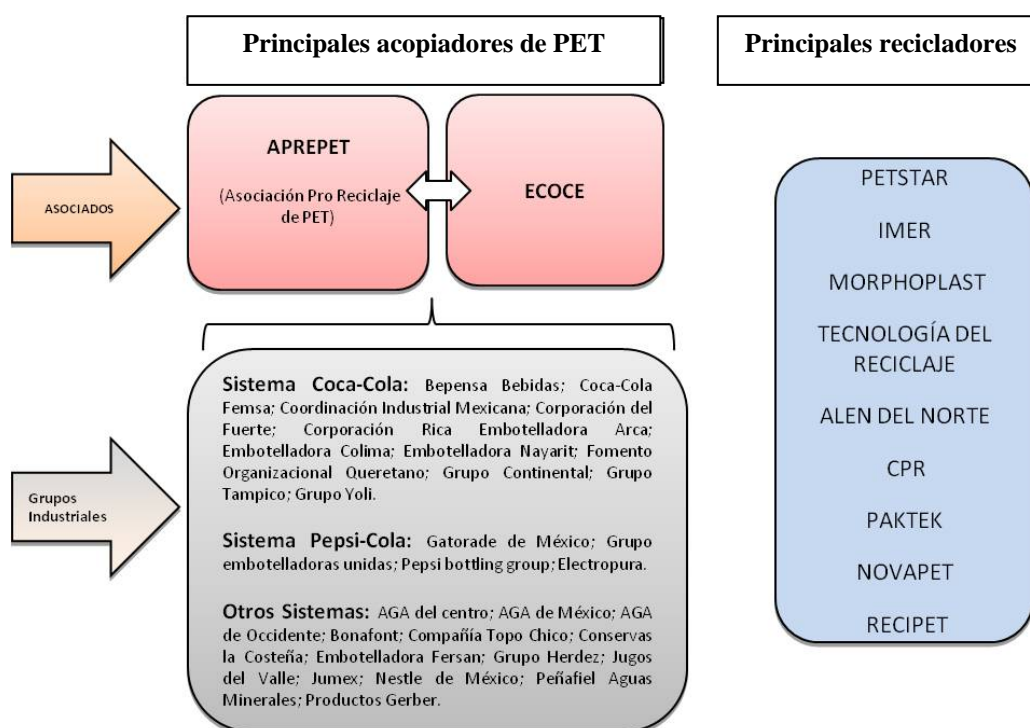


Fig. 9 Principales acopiadores y recicladores de envases de bebidas de PET

En el caso de la información correspondiente a los procesos de producción de resina virgen en México se contactó a PEMEX para la solicitud de los inventarios correspondientes a los procesos de extracción y refinación del petróleo y el gas natural hasta la producción de petroquímicos básicos, como el P-xileno y resinas sintéticas como el Etilenglicol (Fig. 10).

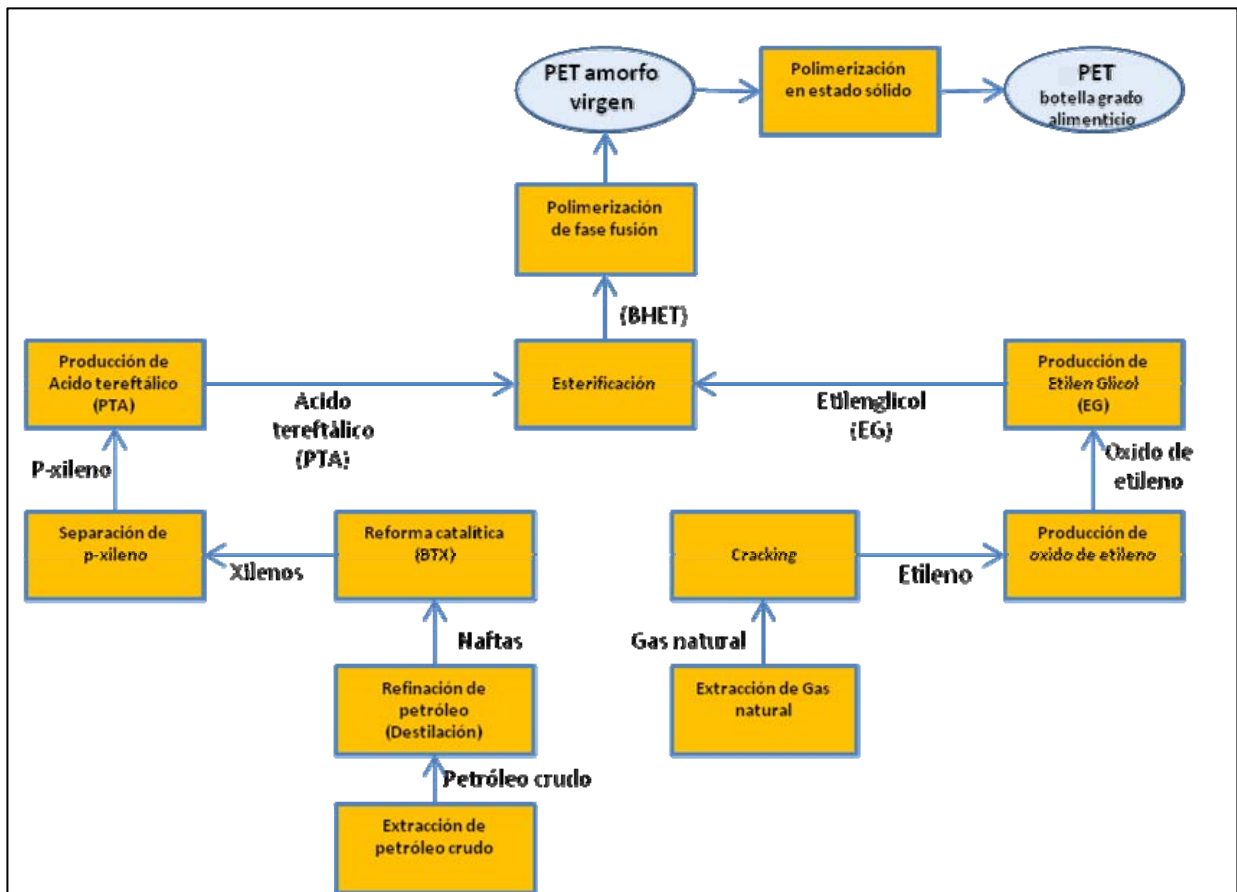


Fig. 10. Proceso de producción de resina PET virgen

7.3 Definición del Flujo de materiales

El diagrama de flujo definido para evaluar el manejo de los envases para bebidas de PET en México se conformó para este estudio en 10 procesos principales que se agruparon en 2 subsistemas del manejo de residuos a estudiar y un subsistema que describe los beneficios ambientales de reciclaje (producción de resina virgen) (Fig. 11).

- 1) Tres procesos para el sistema base nacional de manejo de RSU que comprende el sistema de recolección, transferencia, y disposición final en relleno sanitario.
- 2) Cinco procesos para el sistema de acopio-reciclaje que incluyen: programas de separación, plantas de selección, acopio-acondicionamiento, reciclaje nacional y reciclaje en el extranjero.
- 3) Dos procesos para los procesos de producción de resina PET virgen: producción de PET grado amorfo virgen y producción de PET para botella grado alimenticio.

Adicionalmente se considera la fracción de PET pos-consumo que no entra al sistema de recolección de RSU: en este caso se ha incluido en el modelo actividades de pepena (separación informal) en los sitios de disposición (tiraderos a cielo abierto, tiraderos clandestinos, barrancas, calles, cuerpos de agua, etc. y su disposición final al medio ambiente.

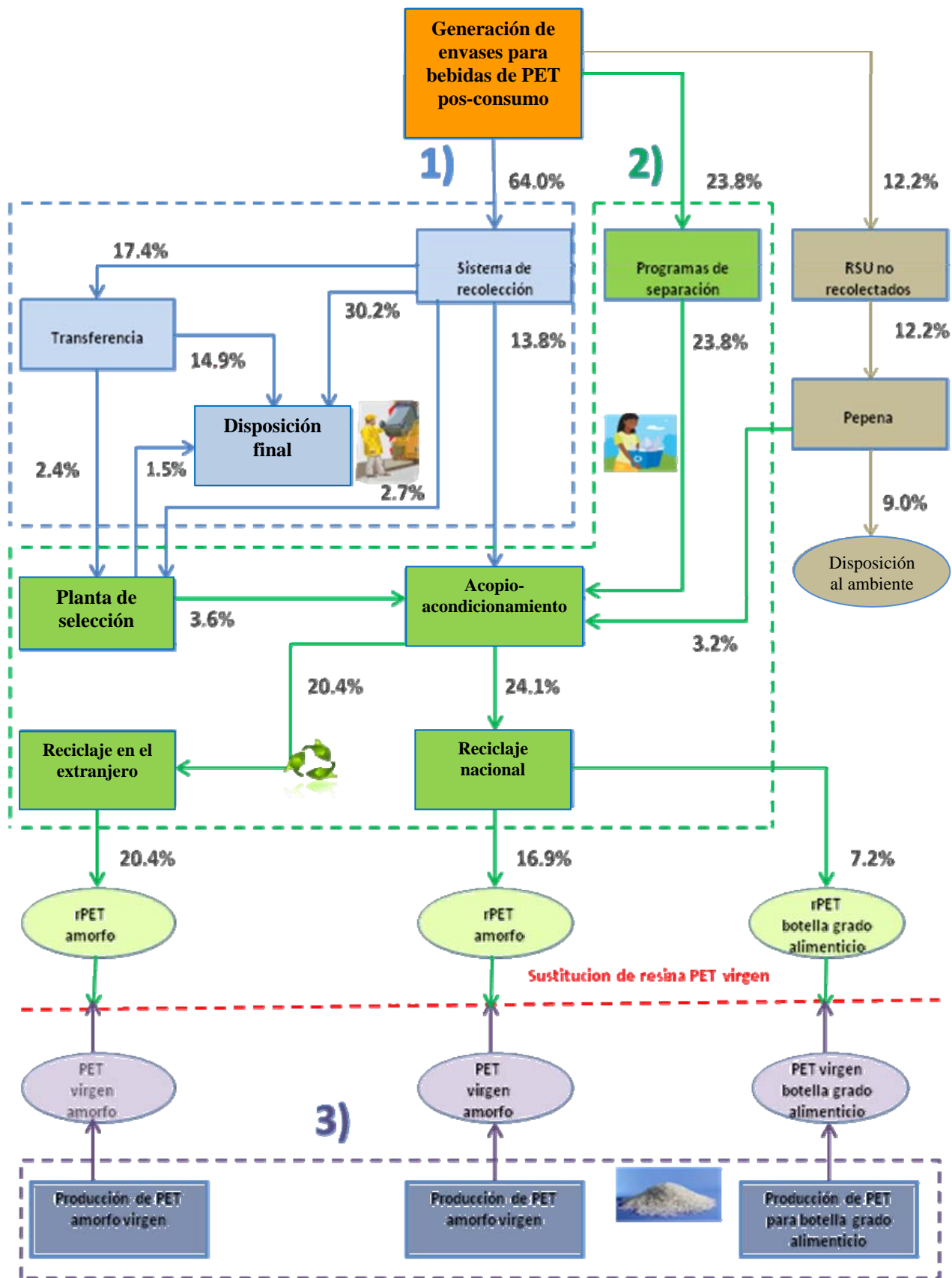


Fig. 11. Diagrama de flujo del ACV de envases para bebidas de PET

La distribución primaria de los envases de bebidas de PET pos-consumo generados se estima de la siguiente forma: aproximadamente el 64% entra al sistema de recolección de RSU del país; el 24 % se separa en la fuente por algún tipo de programa de separación y el 12 % de la fracción PET no entra al sistema de recolección ni se canaliza a ningún programa de separación. De los envases para bebidas de PET no retornables que entran al sistema, se estima que se recupera para reciclaje el 44.5%; cerca del 46.5 % es dispuesto en tiraderos a cielo abierto, sitios controlados o rellenos sanitarios; y aproximadamente el 9% se desecha al ambiente en tiraderos clandestinos, cuerpos de agua, vía pública, etc. (Fig. 11).

Las vías de recuperación de los envases para bebidas de PET pos-consumo es el en base al total del material entrante al sistema: el 23.8% se recupera por programas de separación; el 13.8% se recupera vía pre pepena en el sistema de recolección de RSU; el 3.6% por plantas de separación y 3.2% por actividades de pepena en tiraderos clandestinos, vía pública y disposición al ambiente. La fracción de envases de PET recuperadas para reciclaje nacional es de 24.1% y aproximadamente el 20.4% es canalizado a reciclaje en el extranjero (Fig. 11).

7.4 Estimación cuantitativa del flujo de materiales

La información correspondiente al sistema de manejo de RSU típico en México y el flujo de la corriente de residuos de envases de bebidas de PET pos-consumo se trabajaron de manera interactiva mediante consultas de referencias, entrevistas a actores y visitas de campo. El sistema definido comprende la recolección de los RSU, estaciones de transferencia, plantas de separación; procesos de pre pepena y pepena en el sistema de manejo de residuos y la disposición final en relleno sanitario. Así mismo, se consideró los RSU que no son recolectados, procesos de pepena en tiraderos clandestinos y la disposición final al medio ambiente.

7.5 Datos del sistema de manejo de RSU en México

Para la elaboración de un modelo del sistema de manejo de RSU en México se trabajó con datos base que fueron utilizados en los diferentes balances de materia, cálculos y estimaciones. El modelo se trabajó con aproximaciones del Distrito Federal (D.F.), que por sus características de consumo, generación de residuos PET, sistema de manejo de residuos, estudios y datos disponibles para el balance nacional y los cálculos correspondientes fue representativo del Interior de la República (I.R.).

Los datos base utilizados en los cálculos para el modelo del sistema de manejo de RSU para este estudio aparecen en la Tabla 1, con la información de la generación de RSU en México empleada en los cálculos de flujo y las concentraciones de la fracción de envases de bebidas de PET pos-consumo en los RSU del país.

Tabla 1. Generación de RSU en México

Datos nacionales (2010-2012)			
112 336 538	hab	Población nacional (2010)	(INEGI,2010)
0.925	kg/día	Generación per cápita nacional	(Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT – INECC (2012)
37 927 624	ton/año	Generación anual nacional de RSU (2010)	Cálculo con datos 2010-2012
Datos D.F. (2010-2012)			
8 851 080	hab	Población D.F. (2010)	(INEGI, 2010)
11 722	ton/día	Generación RSU D.F. (2010)	(Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT-INECC (2012)
4 278 530	ton/año	Generación de RSU en el D.F. (2010)	Estimaciones INECC con datos 2010-2012

En la Tabla 2, se presentan los datos relativos al sistema de recolección en México empleados en las estimaciones de PET entrantes al sistema de recolección y la estimación de la fracción PET pos-consumo no recolectado.

Tabla 2. Porcentaje de recolección de RSU en México

RSU entrantes al Sistema de Recolección	ton/año	% recolección	Referencias
RSU recolectados en el D.F.	4 064 604	95.0	GDF, 2012
RSU recolectados en el Interior de la República	27 794 600	83.0	Cálculos con datos Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT-INECC (2012).
RSU recolectados nacional	31 859 204	84.0	Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT-INECC (2012).

El modelo del sistema de manejo de residuos fracción PET pos-consumo empleó como base de cálculo los datos de los estudios realizados por tres instituciones académicas (UNAM, UAM, CIEMAD-IPN) para la caracterización de trece estaciones de transferencia y una planta de selección de RSU en el D.F. El % de PET contenido en la corriente de RSU del D.F. fue un dato base para la estimación del PET en el sistema de manejo de residuos el país, mediante balances de masa con respecto a la producción de envases de bebidas de PET reportada por el sector industrial (Tabla 3).

Tabla 3 Estimación de PET en sistema de manejo de residuos y PET no recolectado

% de PET en la corriente de RSU del D.F. (después de la recolección sin considerar la pre pepena)	0.0237	Estudios UNAM, UAM, CIEMAD-IPN: Estudio IMER, 2010	
Recuperación de PET por programas de separación (ton)	170 494	Recopilación de datos de Planes de Manejo de PET, Programas de Acopio y Centros de Acopio reportados en el país.	
Estimación de Botellas pos-consumo PET entrantes al Sistema de recolección (con pre pepena)			
	%	ton/año	Referencia
Sistema de recolección de RSU (D.F.)	2.37	96 331	Cálculos en base a 715 167 ton/año de Botella PET pos-consumo y empleando el % de PET en RSU del D.F.
Sistema de recolección de RSU (I.R.)	0.94	262 623	
Sistema de recolección de RSU nacional	1.13	358 954	
Estimación de botellas pos-consumo PET entrantes al sistema de recolección (sin pre pepena)			
	%	ton/año	Referencia
Sistema de recolección de RSU D.F.	3.02	122 784	Cálculos en base a 715 167 ton/año de Botella PET pos-consumo; pre pepena de 22% estimada con datos de campo en el D.F.
Sistema de recolección de RSU interior de la república	1.20	334 741	
Sistema de recolección de RSU nacional	1.44	457 525	
Estimación de PET pos-consumo no recolectado por el Sistema de recolección de RSU	12.19	87 148	Cálculo mediante balance de datos referenciados a 715 167 ton/año de Botella PET pos-consumo y 170 494 ton de PET recuperadas por Programas de separación.

Se considera también la recuperación de PET por Programas de separación, flujo que no entra el sistema de recolección por corresponder a actividades de separación en la fuente, como programas de separación-acopio de la iniciativa privada y el sector gubernamental, así como planes de manejo de PET reportados en el país; dato que permitió estimar la cantidad de PET que no entra el sistema de recolección (Tabla 3).

Tabla 4 Estimación de PET pos-consumo canalizado por estaciones de transferencia

Estaciones de transferencia en México	Número de estaciones de transferencia	RSU canalizados a estaciones de transferencia (ton/año)	Porcentaje (%) de RSU por transferencia (en relación a los RSU generados en la región)	Referencias
Distrito Federal	13	3 089 099	76	Datos GDF, 2010; Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT-INECC (2012).
Interior de la República	73	5 385 995	19	Estimación en base a Datos Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT-INECC (2012); y modelo de plantas de transferencia en el Interior de la República*
Nacional	86	8 475 093	27	Estimación en base a Datos Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT-INECC (2012); GDF, 2010 y Modelo de plantas de transferencia en el interior de la república.
3				
Estaciones de transferencia en México	PET pos-consumo canalizado a estaciones de transferencia (ton/año)	Porcentaje de PET pos-consumo por transferencia (%)	Referencias	
Distrito Federal	73 212	27	Estimación en base a Datos GDF, 2010; Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT-INECC (2012); Estudios UNAM, UAM, CIIEMAD-IPN: Estudio IMER, 2010	
Interior de la República	50 891		Estimación en base a Datos Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT-INECC (2012); Modelo de plantas de transferencia en el Interior de la República*;	
Nacional	124 102		Estimación en base a Datos GDF, 2010; Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT-INECC (2012); Estudios UNAM, UAM, CIIEMAD-IPN: Estudio IMER, 2010; Modelo de plantas de transferencia en el Interior de la República*;	
* Porcentajes calculados en relación al PET pos-consumo entrante al sistema de recolección de RSU nacional: 457 525 ton/año				

Las fracciones de PET canalizados por estaciones de transferencia (Tabla 4) se estimaron a partir de información correspondiente al D.F. y un modelo para el Interior de la República considerando estaciones de transferencia promedio con 1 tolva; tiempo de servicio de 11.22 min (0.187 hr); vehículos recolectores de 4.5 ton, vehículos de transferencia de 20 ton; eficiencia de operación de la estación de 70%; tasa de llegada de 4 vehículos /hr; 1 turnos diarios de 10 hrs; y una capacidad de operación diaria de 202 ton/día por estación de transferencia.

Tabla 5 RSU canalizados a plantas de separación

	Generación municipio (ton/día)	Ingreso a la planta (ton/día)	Eficiencia recuperación de productos	Residuos ingresados a planta (ton/año)*
Área Metropolitana de la Ciudad de Guadalajara				
Guadalajara, Jalisco	1 431	90	6%	23 400
Área Metropolitana de la Ciudad de Monterrey				
Apodaca, Nuevo León	5 206	3 000	2%	780 000
General Escobedo, Nuevo León				
Guadalupe, Nuevo León				
Monterrey, Nuevo León				
San Nicolás de los Garza, Nuevo León				
San Pedro Garza García, Nuevo León				
Santa Catarina, Nuevo León				
Área Metropolitana de la Ciudad de México				
Naucalpan, Edo. México	889	40	3%	10 400
Nicolás Romero, Edo. México	649	300	25%	78 000
D.F.				
Santa Catarina	11 350	4500	10%	1 170 000
Bordo Poniente				
San Juan de Aragón				
Querétaro, Querétaro	682	29	11%	7610
Puebla, Puebla	1 147	60	3%	15 600
Subtotal de RSU ingresados a plantas de selección (D.F.)				1 170 000
Subtotal de RSU ingresados a plantas de selección (I.R.)				915 010
TOTAL				2 085 010
* Considerando 5 día laborados a la semana (260 días/año); Estimaciones en base a Datos Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT (2012).				

La fracción de PET pos-consumo canalizado a Plantas de separación en el sistema de manejo de RSU en México, así como las fracciones separadas para acopio y reciclaje, así como la fracción enviada a Disposición Final se estimaron en base a la información del Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT-INECC (2012); versión preliminar octubre 2012. Los datos base empleados en los cálculos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6 Estimaciones de PET canalizado y recuperado en plantas de separación

% PET en RSU (D.F.)	2.37	Estimaciones en base a Datos GDF, 2010; Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT-INECC (2012); Estudios UNAM, UAM, CIEMAD-IPN; Estudio IMER, 2010; Inventario de los Residuos Sólidos D.F., 2010; Datos de campo proporcionados por Jefe Departamento a Mantenimiento Plantas de separación GDF, 2012.
% PET en RSU (I.R.)	0.94	
PET canalizado a planta de separación D.F. (ton/año)	27 729	
PET a plantas de separación en I.R. (ton/año)	8 646	
PET canalizado a plantas de selección Nacional (ton/año)	36 375	
% PET canalizado a plantas de separación en base al PET entrante al sistema de recolección.	8.0	
Estimación de PET recuperado en plantas de selección* (ton/año)	25 881	Estimaciones en base a Datos GDF, 2010; Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, 2012, SEMARNAT-INECC (2012); Estudios UNAM, UAM, CIEMAD-IPN; Estudio IMER, 2010; Inventario de los Residuos Sólidos D.F., 2010; Datos de campo proporcionados por Jefe Departamento a Mantenimiento Plantas de separación GDF, 2012.
Estimación de PET canalizado a disposición final desde plantas de selección* (ton/año)	10 494	
Estimación de % PET recuperado en plantas de selección*	5.7	
Estimación de % PET canalizado a disposición final desde plantas de selección*	2.3	
* Estimación en base a la eficiencia de separación en plantas de selección del D.F.: recuperación de PET sobre PET disponible; fracción porcentual= 0.52; cálculo en base al PET que entra al sistema de recolección de RSU.		

7.6 Datos del sistema de producción y reciclaje de PET en México

De acuerdo a información del Anuario Estadístico 2012 de la Asociación Nacional de Industrias del Plástico (ANIPAC); del mercado total de PET en México, cerca del 40% corresponde a refrescos no retornables y 15% a aguas purificadas; de aquí se estima poco más del 50% del mercado de PET en México para los envases de bebidas de PET, fracción al que se ocupa este estudio (Fig. 12). El resto del mercado PET en México corresponde principalmente a refrescos no retornables (17%), aceites (16%), conservas, cosméticos, agroquímicos y licores (8%), lámina de PET (2%) y otros usos (2%).

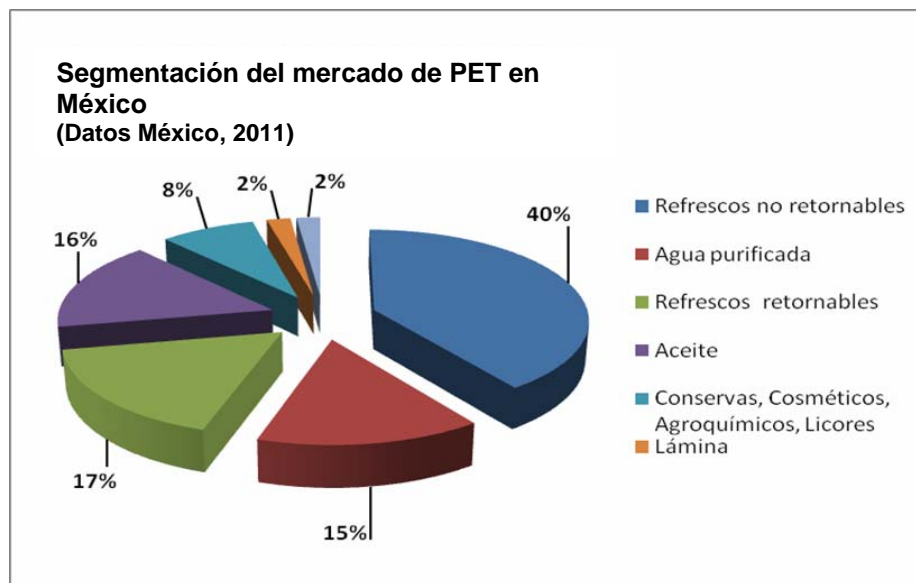


Fig. 12. Segmentación del mercado de PET en México

Los balances de materia del sistema a evaluar se calcularon en base a los datos reportados por el sector industrial para el año 2011 en relación a la producción nacional en México de envases para bebidas de PET (613 000 ton/año); la recuperación nacional para reciclaje de PET (318 000 ton/año) y, las fracciones recuperadas para reciclaje nacional (172 000 ton/año) y en el extranjero (146 000 ton/año).

Tabla 7. Balance de producción, manejo pos-consumo y reciclaje de envases de bebidas de PET

	Botella PET producto terminado* (ton)	Producción botella PET (ton)	%
Factor de ajuste (6/7)		0.857	
Producción nacional	715 167	613000	100.0
Disposición final	333 073	285 491	46.6
Recuperación	318 000	272 571	44.5
Disposición al ambiente	64 094	54 938	9.0
Recuperación para reciclaje nacional	172 000	147 429	24.1
Recuperación para reciclaje en el extranjero	146 000	125 143	20.4
Recuperación para reciclaje nacional			
Reciclaje B-B (grado alimenticio)	51 450	44 100	7.2
Reciclaje B-F	45 700	39 171	6.4
Reciclaje B-L	57 700	49 457	8.1
Reciclaje B-B (grado no alimenticio)	17 150	14 700	2.4
Datos ECOCE, 2011 * Considera la botella PET con tapa y etiqueta, se aplica factor de corrección de (6/7) proporcionado por ECOCE para su estimación			

Así mismo, los tipos de reciclaje del sistema modelado se basan en los datos reportados sobre Reciclaje Botella- Botella (B-B) grado alimenticio; Reciclaje Botella- Lámina (B-L) y Reciclaje Botella-Botella (B-B) grado no alimenticio (Tabla 7). Los datos han sido ajustados mediante el factor (6/7) para tener la fracción del envase de bebidas de PET (producto terminado con tapa y etiqueta) que corresponde únicamente al envase PET.

En base a toda la información se conformó el modelo del sistema de manejo de RSU en México, se definieron como flujos primarios de los envases de bebidas de PET pos-consumo el sistema de recolección, al cual entra aproximadamente el 64% de PET; los Programas de separación representan la fracción separada en la fuente, que podría alcanzar el 24% según los datos reportados en el país y cerca del 12 % de la fracción PET que inicialmente no entra al sistema de recolección ni tampoco es canalizada a algún programa de separación (Fig. 13).

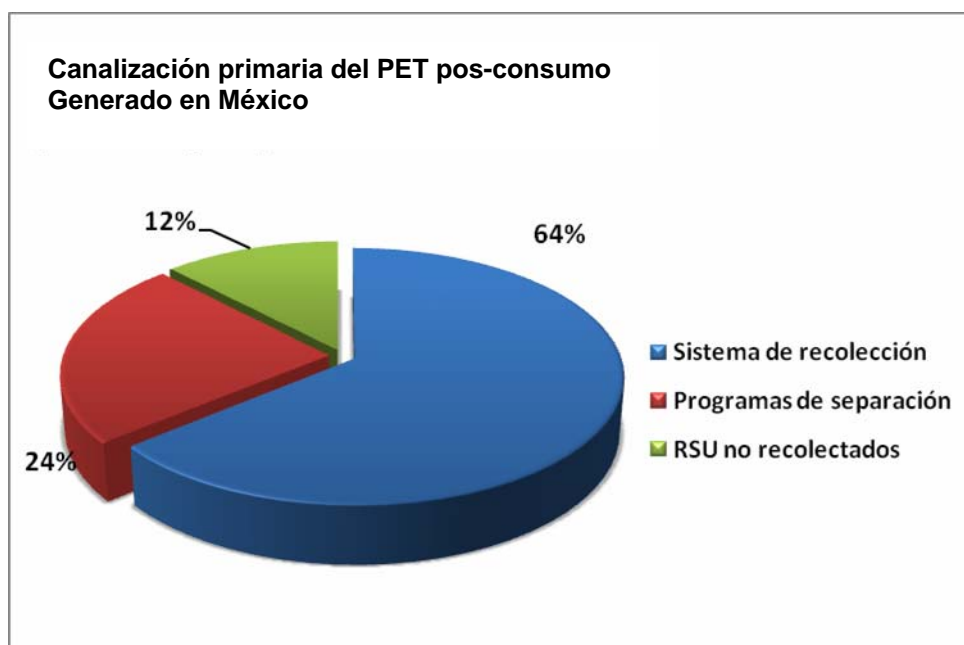


Fig. 13. Canalización primaria del PET pos-consumo generado en México

En cuanto al destino final de los envases para bebidas de PET producidos en México, se estimó que cerca del 47% es dispuesto en tiraderos a cielo abierto, sitios controlados o relleno sanitario; el 24% es recuperado para reciclaje nacional; el 20% es recuperado para reciclaje en el extranjero y cerca del 9% se desecha al ambiente en tiraderos clandestinos, cuerpos de agua, vía pública, etc. (Fig. 14).

La fracción de PET recuperado para reciclaje, consideró en este estudio 4 vías principales: programas de separación que podría alcanzar poco más del 50% del total de PET recuperado; vía pre pepena y pepena en el sistema de recolección de RSU con cerca del 31%; 8% a través de plantas de selección y, 7% mediante actividades de pepena en tiraderos clandestinos, vía pública y disposición al ambiente (Fig. 15).

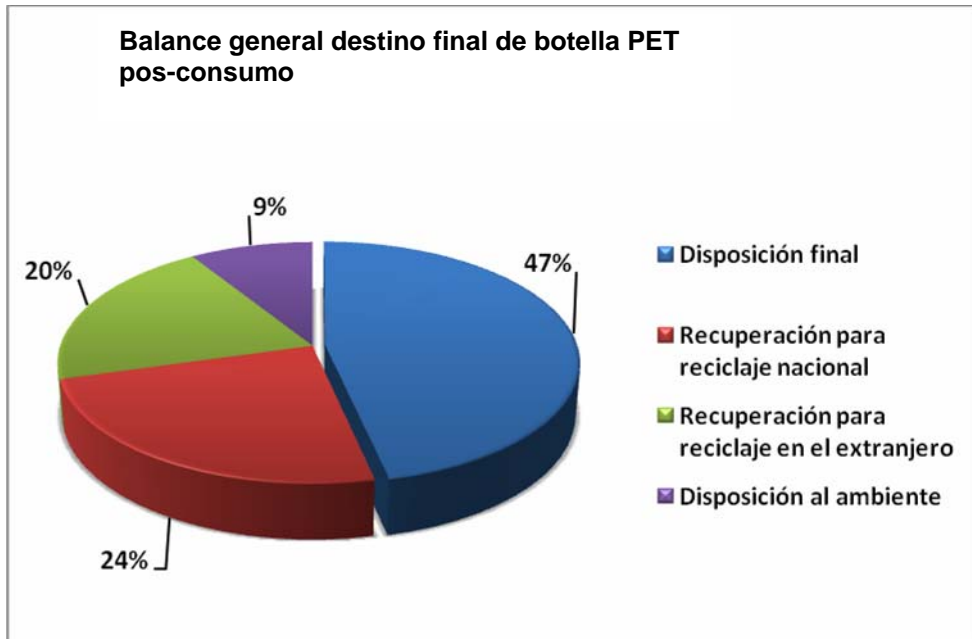


Fig. 14. Destino final de los envases para bebidas de PET pos-consumo en México

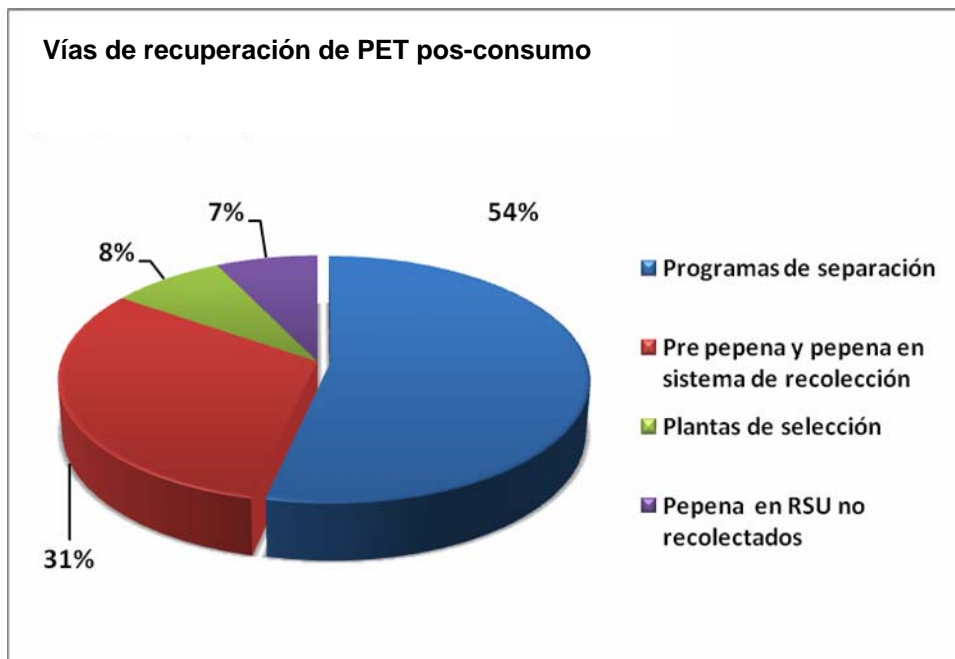


Fig. 15. Principales vías de recuperación de PET pos-consumo en México

8. Metodología para la recopilación de Inventarios de Ciclo de Vida (ICV)

Se definió como un su objetivo específico el establecimiento de inventarios de ciclo de vida mediante estrategias de consulta y obtención de información para la eventual conformación de inventarios con datos mexicanos como línea de trabajo principal. Sin embargo, dados los tiempos de recopilación de la información y a la falta de datos de los procesos de producción de resina PET virgen, se trabajó alternativamente con bases de datos internacionales, véase Tabla 8.

La recopilación de los inventarios de ciclo de vida con datos mexicanos requirió establecer una metodología de consulta con los diversos actores relacionados al ciclo de vida de los envases para bebidas de PET, que consistió en la identificación de los procesos clave, como ya se ha descrito en la sección anterior, la conformación de las herramientas de recopilación de información y la ejecución misma de las consultas.

8.1 Herramienta para recopilación de ICV con datos mexicanos

Una vez definidos los procesos del ACV de envases de bebidas de PET pos-consumo, se definieron herramientas específicas para la recopilación de información correspondientes a los procesos industriales de producción de resinas vírgenes y resinas recicladas, empleando dos estrategias principales: obtención de información directamente con los actores claves del sector industrial y la consulta de bases de datos agregadas generadas en la SEMARNAT.

En ambos casos se utilizó un formato de recopilación de Información conteniendo lo datos necesarios para la conformación de inventarios. La información básica a compilar en el formato de Recopilación de Inventario (Anexo 1) empleada para el presente ACV es la siguiente:

- Datos primarios de Insumos y productos de Proceso (consumo anual de insumos materiales y energéticos del proceso productivo; producción anual de productos y subproductos).
- Datos primarios correspondientes a emisiones del proceso (emisión anual a la atmósfera de contaminantes criterio normados en México; emisiones en descargas de agua residuales; generación de residuos peligrosos)
- Datos primarios correspondientes al transporte de insumos, productos y residuos.

8.2 Conformación de ICV

La modelación del sistema definido se desarrollo utilizando bases de datos extranjeras y datos nacionales; los procesos involucrados, la base de datos empleada y el modulo empleado en la programación se describen a en la Tabla 8.

Tabla 8 Conformación de Inventarios de Ciclo de Vida (ICV)

Proceso	Modulo utilizado	Características	Base de datos
Disposición final en relleno sanitario	<i>Disposal Polyethylene terephthalate, 0.2% water, to sanitary landfill</i>	Descripción Ecoinvent v2.1: Inventoried waste contains 100% PET; waste composition (wet, in ppm): upper heating value 23.13 MJ/kg; lower heating value 22.95 MJ/kg; H2O 2000; O 368750; H 63380; C 553640; S 147.87; N 6456.8; P n.a.; B n.a.; Cl 788.62; Br 69.004; F 11.829; I n.a.; Ag n.a.; As 1.873; Ba 49.289; Cd 3.2531; Co 31.052; Cr 5.4218; Cu 11.829; Hg 0.08872; Mn 17.744; Mo n.a.; Ni 3.9431; Pb 5.5203; Sb 159.2; Se 2.0701; Sn 0.98577; V 1281.5; Zn 68.676; Be 0.49289; Sc n.a.; Sr 87.241; Ti 985.77; Tl 0.39431; W n.a.; Si n.a.; Fe 98.577; Ca 295.73; Al 197.15; K n.a.; Mg n.a.; Na 1444.7; Share of carbon in waste that is biogenic 0%; Overall degradability of waste during 100 years: 1%.	Ecoinvent v2.1
Plantas de selección	<i>Mixed recyclables, sorted at MRF</i>	Modelo aplicable a 1 kg de cualquier salida de material reciclable (plásticos, papel, acero, aluminio, etc) Se emplea modelo de generación energética <i>Electricity mix México (Medium odeled)</i> , para datos inventarios ver Tabla 9	NREL , National Renewable Energy Laboratory Modelo de generación energética- combustibles: Ecoinvent v2.1
Acondicionamiento para reciclaje	<i>Conformación con datos mexicanos</i>	Se considera proceso de compactación mecánica.	Modelo de generación energética- combustibles: Ecoinvent v2.1
Reciclaje PET grado botella, proceso nacional	<i>Recycled Postconsumer PET pellet</i>	Se emplea modelo de generación energética <i>Electricity mix México (Medium odeled)</i> , para datos inventarios ver Tabla 11	NREL , National Renewable Energy Laboratory Modelo de generación energética- combustibles: Ecoinvent v2.1
Reciclaje PET amorfo, proceso de reciclaje nacional	<i>Recycled Postconsumer PET flake</i>	Se emplea modelo de generación energética <i>Electricity mix México (Medium odeled)</i> , para datos inventarios ver Tabla 10	NREL , National Renewable Energy Laboratory Modelo de generación energética- combustibles: Ecoinvent v2.1
Reciclaje PET amorfo, proceso de reciclaje en el extranjero	<i>Recycled Postconsumer PET flake</i>	Se emplea modelo de generación energética <i>Electricity, médium odeled, at grid (CN)</i> , para datos inventarios ver Tabla 10	NREL , National Renewable Energy Laboratory Modelo de generación energética- combustibles: Ecoinvent v2.1
Producción de resina PET amorfo nacional	<i>Polyethylene terephthalate, granulate amorphous, at a plant</i>	Los datos se basan en el proceso unitario promedio de la industria europea de plásticos (datos 1995-2000).	Ecoinvent v2.1
Producción de resina PET amorfo en el extranjero	<i>Polyethylene terephthalate, granulate amorphous, at a plant</i>	Los datos se basan en el proceso unitario promedio de la industria europea de plásticos (datos 1995-2000).	Ecoinvent v2.1

Vehículo recolector de RSU	<i>Transport, lorry 3.5-7.5 t, EURO 3</i>	Descripción Ecoinvent v2.1: Inventory refers to the entire transport life cycle. For road infrastructure, expenditures and environmental interventions due to construction, renewal and disposal of roads have been allocated based on the Gross value added performance. Expenditures due to operation of the road infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly vehicle value added performance. For the attribution of vehicle share to the transport performance a vehicle life time performance of 540000 vkm/vehicle has been assumed (datos 1995-2000).	Ecoinvent v2.1
Vehículo de transferencia de RSU (transfer)	<i>Transport, lorry 16-32t, EURO 3</i>	Descripción Ecoinvent v2.1: Inventory refers to the entire transport life cycle. For road infrastructure, expenditures and environmental interventions due to construction, renewal and disposal of roads have been allocated based on the Gross value added performance. Expenditures due to operation of the road infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly vehicle value added performance. For the attribution of vehicle share to the transport performance a vehicle life time performance of 540000 vkm/vehicle has been assumed (datos 1995-2000).	Ecoinvent v2.1
Vehículo para transporte de PET (programas de separación)	<i>Transport van <3.5t</i>	Descripción Ecoinvent v2.1: Inventory refers to the entire transport life cycle. For road infrastructure, expenditures and environmental interventions due to construction, renewal and disposal of roads have been allocated based on the Gross value added performance. Expenditures due to operation of the road infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly vehicle value added performance. For the attribution of vehicle share to the transport performance a vehicle life time performance of 220000 tkm/vehicle has been assumed (datos 1995-2000).	Ecoinvent v2.1
Vehículo para transporte de PET pos-consumo	<i>Transport, lorry 3.5-7.5 t, EURO 3</i>	Descripción Ecoinvent v2.1: Inventory refers to the entire transport life cycle. For road infrastructure, expenditures and environmental interventions due to construction, renewal and disposal of roads have been allocated based on the Gross value added performance. Expenditures due to operation of the road infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly vehicle value added performance. For the attribution of vehicle share to the transport performance a vehicle life time performance of 540000 vkm/vehicle has been assumed (datos 1995-2000).	Ecoinvent v2.1
Modelo de generación energética para México	<i>Electricity mix México (Medium value added)</i>	Módulo creado por IFEU en base al Módulo "electricity, medium value added, at grid (US)" usando mezcla de tecnologías para generación energética de México.	Ecoinvent v2.1
Modulo de generación energética para China	<i>Electricity, value added voltage, at grid (CN)</i>	Descripción Ecoinvent v2.1: Supply mix is identical to production mix at medium voltage grid. Dataset value added on the basis of equivalent European datasets, where calculation of losses follows the same scheme. Chinese total (no voltage level) losses percent from 2004 IEA statistics.	Ecoinvent v2.1

Los datos empleados para los inventarios de plantas de separación, proceso de producción de rPET amorfo y proceso de producción de rPET grado botella uso alimenticio se obtuvieron a través de consultas a la base de datos de Estados Unidos (consultas enero 2013) los cuáles han sido adaptados a la nomenclatura y unidades de Ecoinvent v2.1.

Tabla 9 Planta de separación
(Datos base: NREL; Mixed recyclables, sorted at MRF)

Entradas	Cantidad	Unidad
Light fuel Oil, burned in boiler 100kW condensing, non modulating	0.0710	MJ
Natural gas, burned in industrial furnace low-Nox> 100 kW	0.0001	MJ
Refinery gas, burned in furnace (RER)	0.0014	MJ
Electricity, medium voltage, at grid (US)	0.0014	kWh
Salidas		
Sorting of PET bottles at sorting plant	1.0000	kg

Tabla 10 Inventario de producción rPET grado amorfo
(Datos base: NREL; Recycled postconsumer PET flake)

Entradas	Cantidad	Unidad Ecoinvent
Electricity, medium voltage at grid (US)	0.4600	kWh
Refinery gas, burned in furnace (RER)	0.0077	MJ
postconsumer PET bottle	1.2500	kg
Natural gas, burned in industrial furnace	2.9000	MJ
Sodium hidroxide, 50% production mix, at plant, (RER)	0.0480	kg
Water Well in ground	0.0004	m3
Salidas		
BDO%, Biological Oxygen Demand (water/ground)	0.0750	kg
COD, Chemical Oxygen Demand (water/ground)	0.0200	kg
rPET amorphous-grade	1.0000	kg
Suspended solids, unespecified (water/unspecified)	0.0100	kg
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified	0.000037	kg
Particulates, > 10 um (air/unspecified)	0.00039	kg

Tabla 11 Inventario de producción de rPET grado botella uso alimenticio
(Datos base: NREL; Recycled postconsumer PET pellet)

Entradas	Cantidad	Unidad Ecoinvent
Electricity, medium voltage at grid (US)	0.9400	kWh
Refinery gas, burned in furnace (RER)	0.0077	MJ
postconsumer PET bottle	1.2500	kg
Natural gas, burned in industrial furnace	2.9000	MJ

Sodium hidroxide, 50% production mix, at plant, (RER)	0.0480	kg
Water Well in ground	0.0004	m3
Salidas		
BDO%, Biological Oxygen Demand (water/ground)	0.0075	kg
COD, Chemical Oxygen Demand (water/ground)	0.0200	kg
rPET bottle-grade	1.0000	kg
Suspended solids, unespecified (water/unspecified)	0.0100	kg
NMVOC, non-methane colatile organic compounds, unespecified	0.000037	kg
Particulates, > 10 um (air/unspecified)	0.00039	kg

Las distancias empleadas para este estudio se enlistan en la Tabla 12; donde las distancias de transporte (Procesos 2, 4, 8 y 11) se emplean cálculos de distancias promedio para la ZMVM en base a ubicación geográfica de Rellenos Sanitarios, Centros de transferencia, Plantas de separación y Plantas de reciclaje. Las distancias de Centros de acopio a Plantas de reciclaje y Puertos de embarque al extranjero se estimaron a partir de información proporcionada por ECOCE y en base a esquemas de la ZMVM. Todas las distancias restantes se han estimado en base a información del sistema de manejo de RSU en México.

Tabla 12. Distancias promedio para módulos de transporte

Proceso		Distancia Promedio
1	Sistema de recolección a centro de transferencia	1.0 km
2	Centros de transferencia a relleno sanitario	48.8 km
3	Sistema de recolección a disposición final directa	1.0 km
4	Centro de transferencia a planta de separación	32.0 km
5	Sistema de recolección a plantas de separación	1.0 km
6	Plantas de selección a relleno sanitario	1.0 km
7	Sistema de recolección a centros de acopio	1.0 km
8	Plantas de selección a plantas de reciclaje	42.8 km
9	Centro de generación de RSU a centros de acopio	5.0 km
10	Sistema de generación a centros de acopio por pepena	5.0 km
11	Centro de acopio a planta de reciclaje nacional	78.2 km
12	Centro de acopio a puerto de embarque al extranjero	1 851 km
13	Transporte marítimo al extranjero	11 923 km
14	Puerto de llegada en el extranjero a planta de reciclaje	2 120 km
15	Ruta de recolección total	20 km

Fuente: estimaciones INECC, con datos de ECOCE y del Gobierno del Distrito Federal.

Las distancias de transporte del sitio de acopio y acondicionamiento al puerto de salida para reciclaje en el extranjero, así como la distancia promedio de transporte marítimo se estimaron a partir de información de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes sobre los principales puertos marítimos de embarque a China (Tabla 13). Las distancias se han estimado utilizando la herramienta *Google earth*.

Tabla 13. Distancia promedio de transporte marítimo México-China

Puerto Salida/Llegada	Shanghái	Ningbo	Tianjin
Manzanillo, Colima	12 695 km	12 715 km	13 099 km
Ensenada, Baja California	10 891 km	10 837 km	11 295 km
Promedio	11 923 km		

9. Resultados de la Evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV)

9.1 Evaluación del actual sistema de manejo de PET pos-consumo en México

A partir de los resultados derivados de la modelación, se observa un incremento de la carga ambiental del escenario actual del sistema de manejo de PET pos-consumo contra el escenario cero en las 6 categorías de impacto, esto principalmente por las actividades de valorización de los envases PET mediante el desarrollo de procesos de reciclaje. Sin embargo, al sustituir el la resina de PET virgen por material reciclado, se obtiene un beneficio por carga ambiental evitada (impactos ambientales netos), lo cual incide en mejorar el desempeño ambiental del escenario actual.

En relación a la categoría impacto de **cambio climático**, el sistema de manejo de residuos en la fracción de residuos de envases para bebidas de PET resulta para el esquema sin valorización en un desempeño ambiental potencial al cambio climático en el orden de **80 264 ton CO₂ Eq**; de donde el 56.6% de las emisiones son generadas por la disposición de los envases de PET en relleno sanitario; 31.3% es debido a las consideraciones hechas por actividades de quema en el sitio de disposición final y 12.1% por el transporte en el sistema de manejo de residuos (Fig. 17a).

En el escenario actual, los impactos del sistema de manejo de residuos para la fracción de envases de PET se reduce en un 40% con respecto al esquema sin valorización; por otro lado existe un incremento en las emisiones con potencial de impacto al cambio climático producidos por el reciclaje nacional **90 284 ton CO₂ Eq**, reciclaje en el extranjero **95 097 ton CO₂ Eq** y transporte para reciclaje en el extranjero **95 704 ton CO₂ Eq** con respecto al esquema sin valorización.

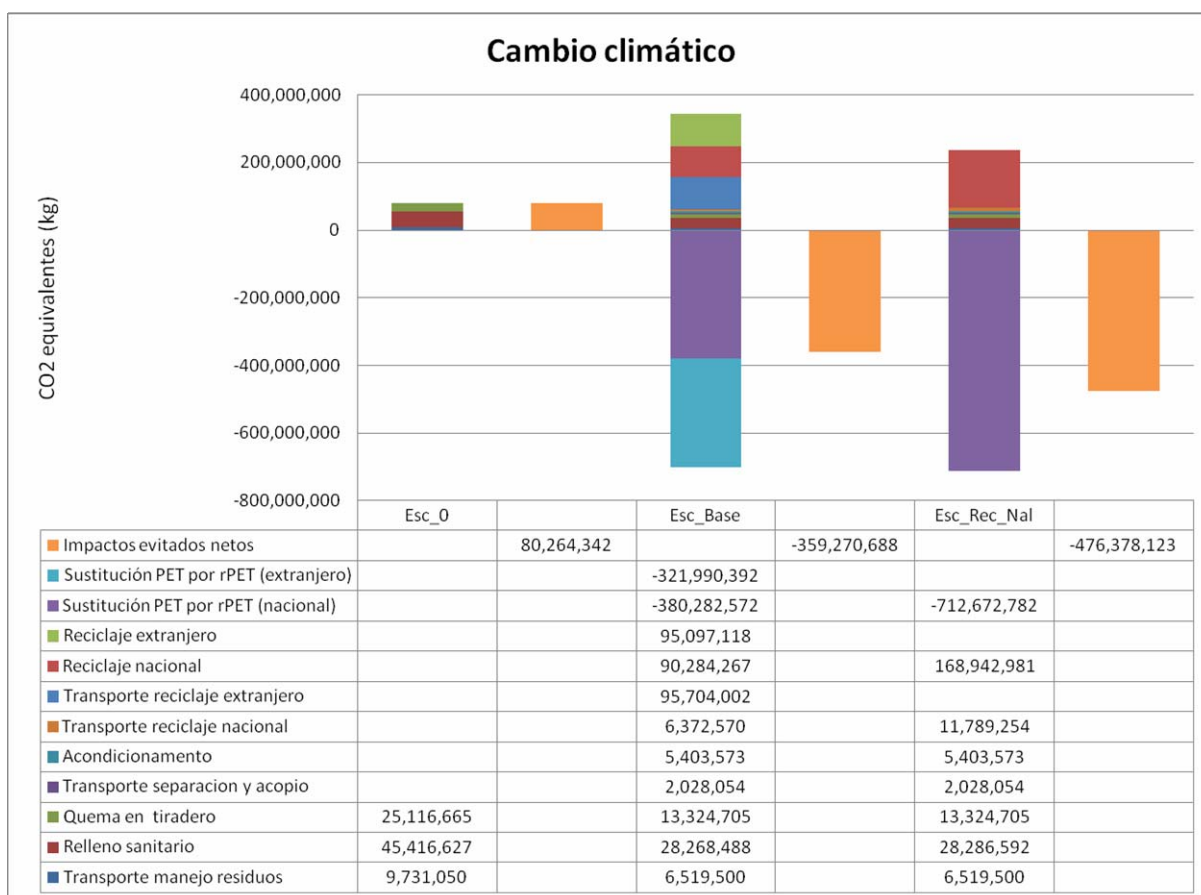


Fig. 17a. Evaluación de escenario de base: cambio climático

Los impactos ambientales al cambio climático evitados por sustitución en los procesos de producción de la resina PET virgen son de **702 273 ton CO₂ Eq**, por lo que los impactos ambientales netos evitados por el actual sistema de valorización de envases para bebidas de PET en México se estiman en **359 271 ton CO₂ Eq/año** (año base 2011). En el caso del escenario en el que se considera el reciclaje nacional del total del PET acopiado, los impactos evitados al cambio climático se estiman en **476 378 ton CO₂ Eq**, lo cual muestra un aumento de los créditos ambientales de aproximadamente 33% con respecto al escenario de nacional/extranjero.

Para la categoría de impacto de **agotamiento de recursos abióticos**, el sistema de manejo de residuos en la fracción de residuos de envases para bebidas de PET genera para el esquema sin valorización impactos ambientales potenciales por **86 ton Sb Eq**; 79% de las emisiones son generadas por el transporte en el sistema de manejo de residuos y 21% es debido a la disposición final en relleno sanitario (Fig. 17b).

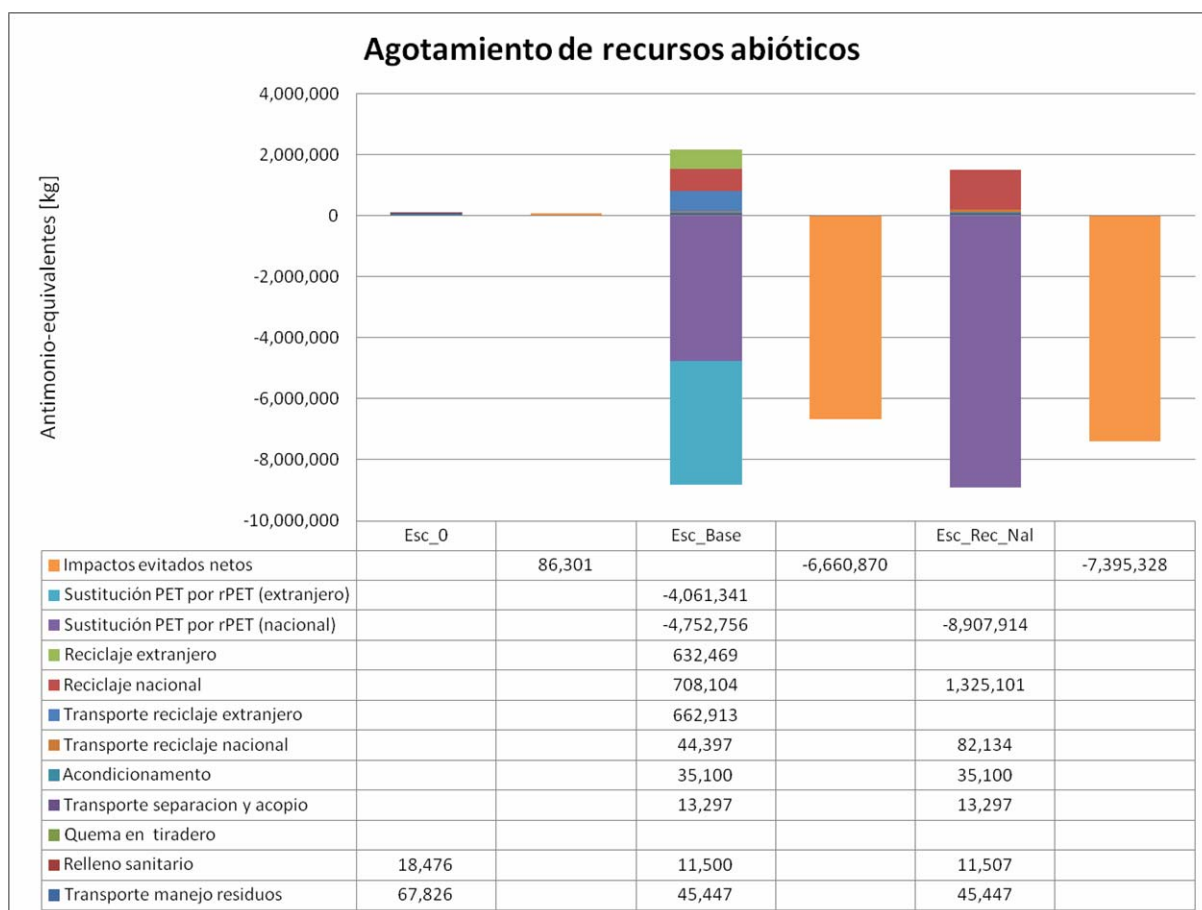


Fig. 17b. Evaluación de escenario de base: agotamiento de recursos abióticos

En el escenario actual, los impactos del sistema de manejo de residuos para la fracción de envases de PET se reduce en un 38% con respecto al esquema sin valorización. Por otro lado existe un incremento de emisiones con potencial de impacto al agotamiento de recursos abióticos derivados por el reciclaje nacional del orden de **708 ton antimonio-equivalentes (Sb Eq)**, el reciclaje en el extranjero con **632 ton Sb Eq** y el transporte para reciclaje en el extranjero **663 ton Sb Eq**. Los impactos ambientales evitados para la categoría de agotamiento de recursos abióticos por sustitución en los procesos de producción de la resina PET virgen es del orden de **8 814 ton Sb Eq**. Los impactos ambientales netos evitados por el actual sistema de valorización de envases para bebidas de PET en México se estima en **6 661 ton Sb Eq/año** (año base 2011). En el caso del escenario en el que se considera el reciclaje nacional del total del PET acopiado, los impactos evitados por agotamiento de recursos abióticos se estiman en **7 395 ton Sb Eq**, esto es un aumento de los créditos ambientales de aproximadamente 10% con respecto al escenario de reciclaje nacional/extranjero (Fig. 17b).

En relación a la categoría impacto de **agotamiento de la capa de ozono**, el sistema de manejo de residuos en la fracción de residuos de envases para bebidas de PET genera en el esquema sin valorización, un impacto potencial ambiental de **1.63 kg CFC-11 Eq**; principalmente por las emisiones generadas en el transporte correspondiente al sistema de manejo de residuos (Fig. 17c).

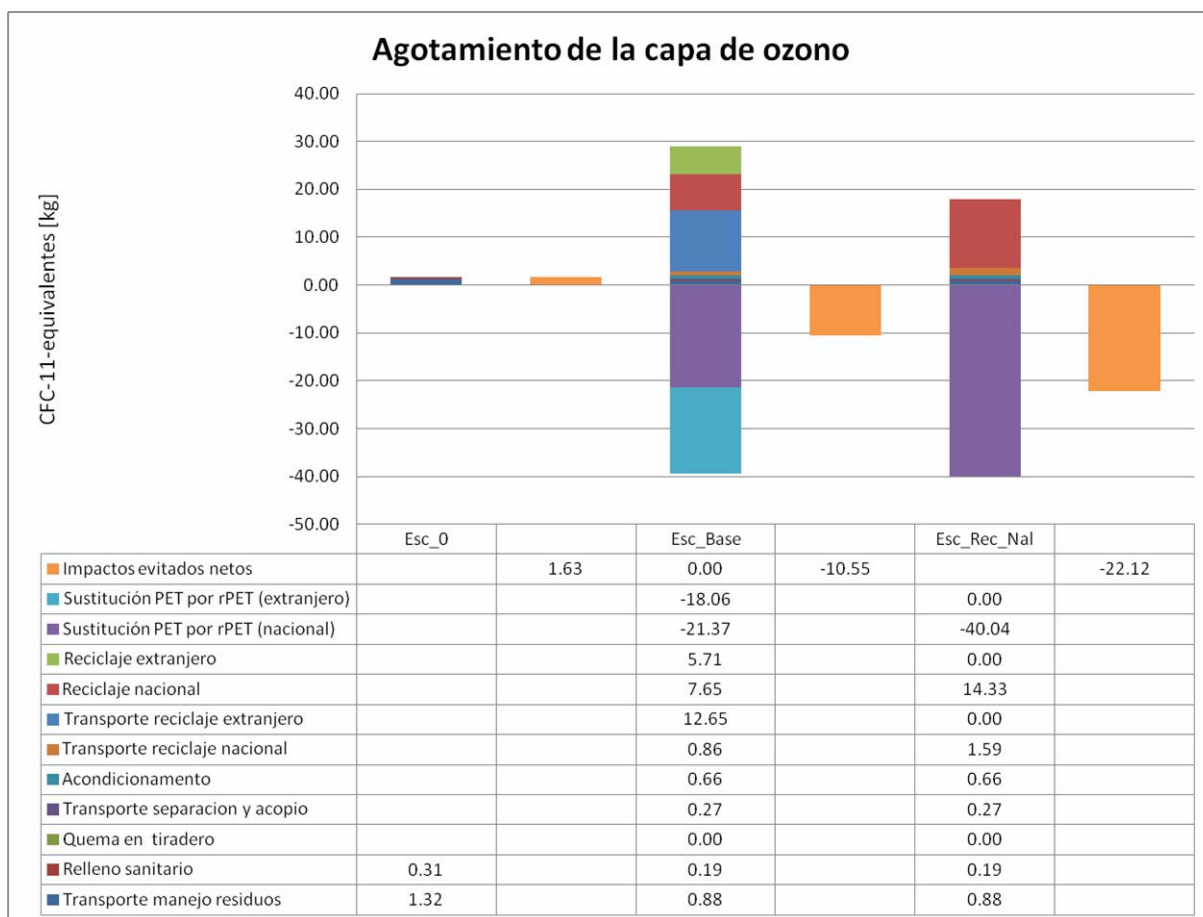


Fig. 17c. Evaluación de escenario de base: agotamiento de la capa de ozono

Para el escenario actual, los impactos del sistema de manejo de residuos para la fracción de envases de PET se reduce en un 34% con respecto al esquema sin valorización; por otro lado existe un incremento de emisiones con potencial de impacto al agotamiento de la capa de ozono producidos por el reciclaje nacional del orden de **7.64 kg CFC-11 Eq**, reciclaje en el extranjero de **5.71 ton CFC-11 Eq** y transporte para reciclaje en el extranjero **12.65 kg CFC-11 Eq**. Las cargas ambientales evitadas para la categoría de agotamiento de la capa de ozono por sustitución en los procesos de producción de la resina PET virgen son de **39.4 kg CFC-11 Eq**. Los impactos ambientales netos evitados por el actual sistema de valorización de envases para bebidas de PET en México se estima en **10.55 kg CFC-11 Eq/año** (año base 2011). En el caso del escenario en el que se considera el reciclaje nacional del total del PET acopiado, los impactos evitados por agotamiento de la capa de ozono se estiman en **22.12 kg CFC-11 Eq**, esto es un aumento de los créditos ambientales de aproximadamente 108.5% con respecto al escenario de reciclaje nacional/extranjero (Fig. 17c).

Para la categoría **impacto de eco toxicidad**, el sistema de manejo de residuos para la fracción de residuos de PET genera en el esquema sin valorización potenciales impactos ambientales por **2 217 714 ton 1-4 DCB Eq**; es decir, 99.95% de las emisiones son generadas por la disposición final en relleno sanitario (Fig. 17d).



Fig. 17d. Evaluación de escenario de base: eco toxicidad

Para el escenario actual, los impactos del sistema de manejo de residuos para la fracción de envases de PET se reduce en un 34% con respecto al esquema sin valorización; por otro lado existe un incremento de emisiones con potencial de impacto por eco toxicidad producidos por el reciclaje nacional de **12 000 ton 1,4 DCB Eq**, reciclaje en el extranjero **13 976 ton 1,4 DCB Eq** y transporte para reciclaje en el extranjero **7 955 ton 1,4 DCB Eq**. Los impactos ambientales evitados para agotamiento de la capa de ozono por sustitución en los procesos de producción de la resina PET virgen son del orden de **150 708 ton 1,4 DCB Eq**. Los impactos ambientales netos evitados por el actual sistema de valorización de envases para bebidas de PET en México se estima en **1 264 535 ton 1,4 DCB Eq/año** (año base 2011). En el caso del escenario en el que se considera el reciclaje nacional del total del PET acopiado, los impactos evitados en la categoría de eco toxicidad se estiman en **1 249 211 ton 1,4 DCB Eq** (Fig. 17d).

Para la categoría **impacto de eutrofización**, el sistema de manejo de residuos en la fracción de residuos de PET genera en el esquema sin valorización impactos ambientales potenciales por **113 ton PO₄ Eq**; de las cuales el 65% de las emisiones son generadas por el transporte del sistema de manejo de residuos y 35% es debido a la disposición final en relleno sanitario (Fig. 18a).

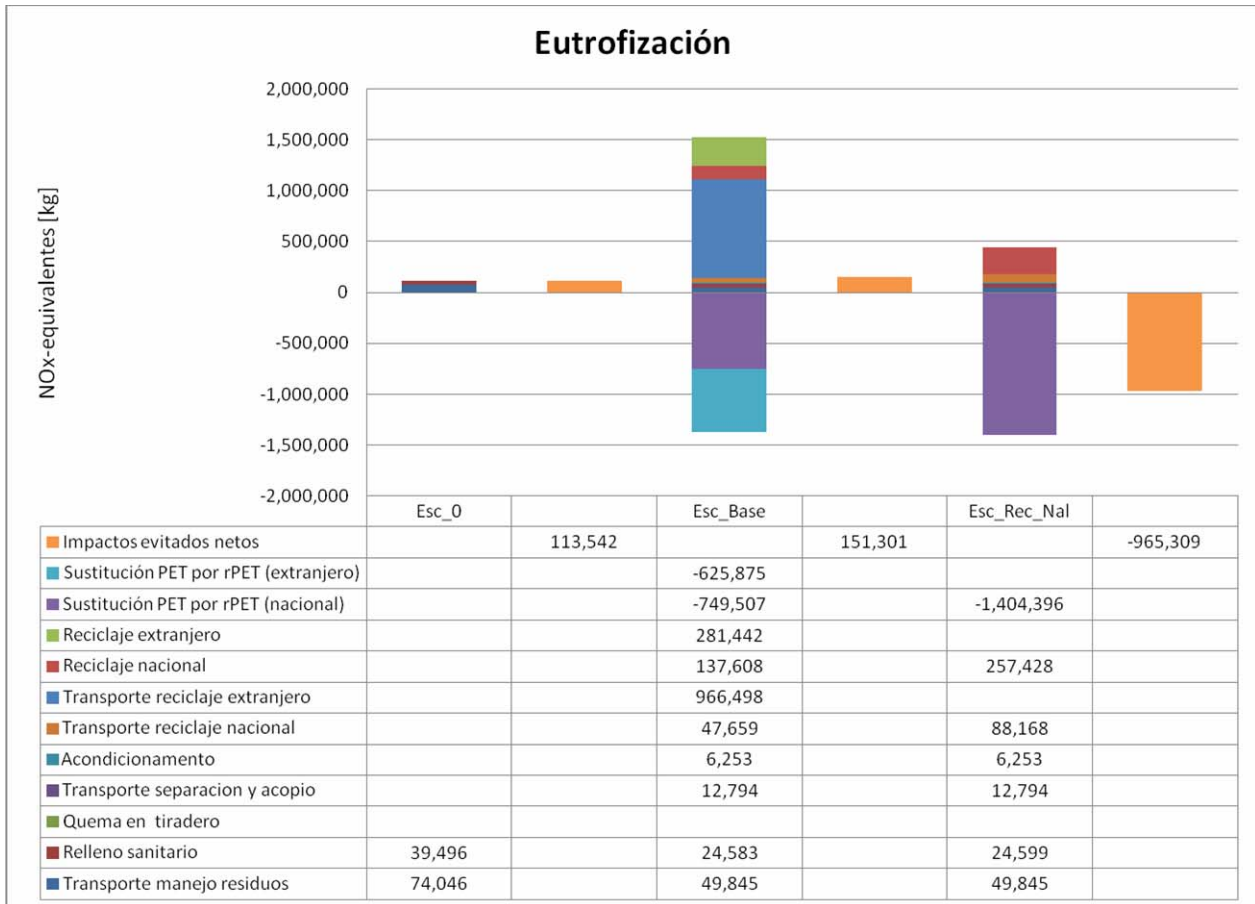


Fig. 18a. Evaluación de escenario de base: eutrofización

Para el escenario actual, los impactos del sistema de manejo de residuos para la fracción de envases de PET se reduce en un 34% con respecto al esquema sin valorización; por otro lado existe un incremento de emisiones con potencial de impacto por eutrofización producidos por el reciclaje nacional de **138 ton NOx Eq**, por el reciclaje en el extranjero de **281 ton NOx Eq** y el transporte para su reciclaje en el extranjero de **966 ton NOx Eq**. Los impactos ambientales evitados en la categoría de eutrofización por sustitución en los procesos de producción de la resina PET virgen son de **1 375 ton NOx Eq**. Los impactos ambientales netos evitados por el actual sistema de valorización de envases para bebidas de PET en México se estima en **151 ton NOx Eq/año** (año base 2011), lo que significa aproximadamente **38 ton NOx Eq/año** más emisiones con potencial de eutrofización que en el escenario sin valorización. En el caso del escenario en el que se considera el reciclaje nacional del total del PET acopiado, los impactos evitados en la categoría de eutrofización se estiman en **965 ton NOx Eq** (Fig. 18a).

Para la categoría de **impacto de acidificación**, el sistema de manejo de residuos en la fracción de residuos de envases PET genera en el caso del esquema sin valorización, impactos potenciales ambientales por **65 ton SO₂ Eq**, donde el 66% de las emisiones son generadas por el transporte en el sistema de manejo de residuos y 34% es debido a la disposición final en relleno sanitario (Fig. 18b).

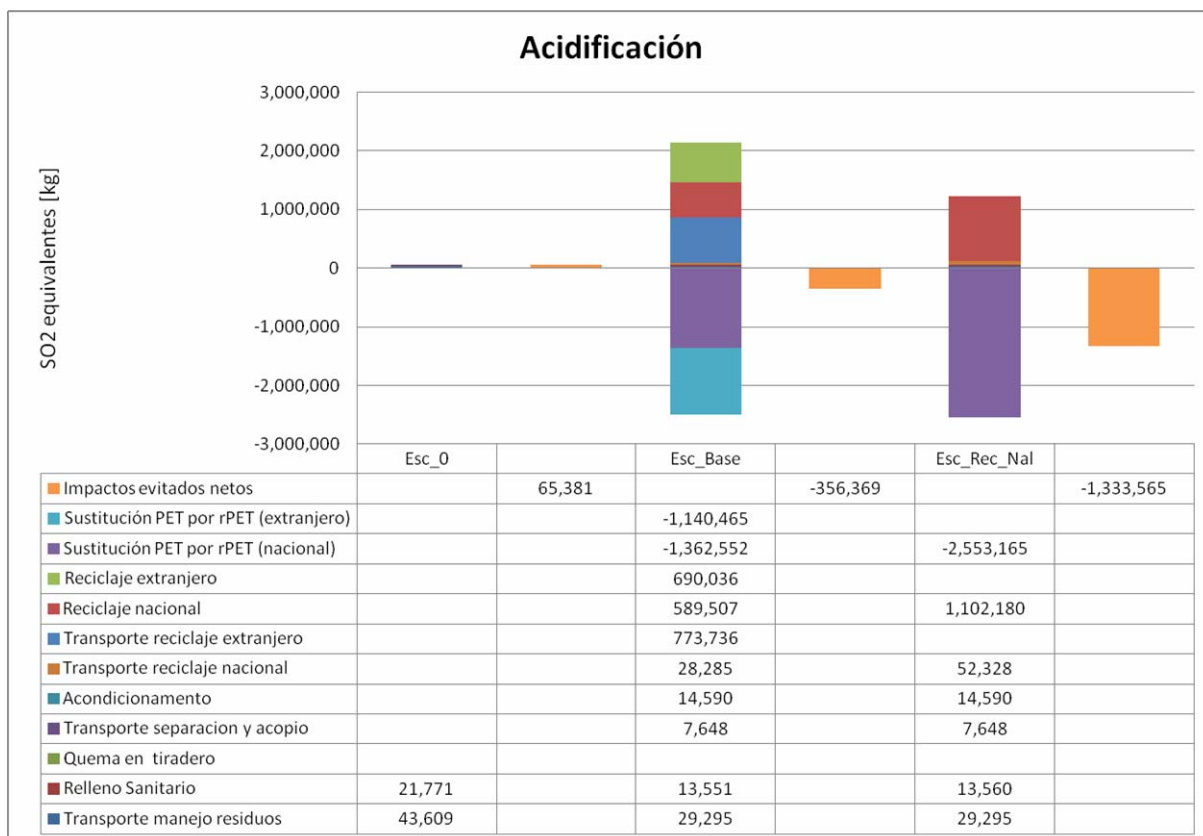


Fig. 18b. Evaluación de escenario de base: acidificación.

Para el escenario actual, los impactos del sistema de manejo de residuos para la fracción de envases de PET se reduce en un 34% con respecto al esquema sin valorización; por otro lado existe un incremento de emisiones con potencial de impacto por acidificación en el escenarios de reciclaje nacional **590 ton SO₂ Eq**, en el reciclaje en el extranjero por **690 ton SO₂ Eq** y transporte para reciclaje en el extranjero **774 ton SO₂ Eq**. Los impactos ambientales evitados para la categoría de acidificación debidos a la sustitución en los procesos de producción de la resina PET virgen son de **2 503 ton SO₂ Eq**. Los impactos ambientales netos evitados por el actual sistema de valorización de envases para bebidas de PET en México se estima en **356 ton SO₂ Eq/año** (año base 2011). En el caso del escenario en el que se considera el reciclaje nacional del total del PET acopiado, los impactos evitados en la categoría de acidificación se estiman en **1 334 ton SO₂ Eq**; esto es un aumento de los créditos ambientales de aproximadamente 274% con respecto al escenario de reciclaje nacional/extranjero (Fig. 18b).

9.2 Evaluación de escenarios con incremento de acopio-reciclaje

Los resultados de la evaluación del incremento en el acopio-reciclaje mediante 4 escenarios diferentes se presentan a continuación para cada una de las categorías evaluadas.

9.2.1 Cambio climático

En la evaluación de 4 escenarios con incremento de acopio-reciclaje, se determinó que existen ventajas ambientales del 50% para los escenarios de acopio-reciclaje mixtos (nacional/extranjero) y del 100% para los escenarios de reciclaje nacional, esto es **700 000 ton CO₂ Eq** evitadas en los escenarios (Esc_V1_Nal y Esc_V2_Nal) contra **350 000 ton CO₂ Eq** reportadas para el escenario actual. Fig. 21).

En cuanto a las estrategias evaluadas para el incremento de acopio a través de mejorar la eficiencia de actividades de pre pepena, pepena y plantas de separación del sistema de manejo de RSU contra los escenarios de aumento de programas de separación en la fuente; se cuantificó un beneficio del **3%** a favor del incremento de acopio por programas de separación.

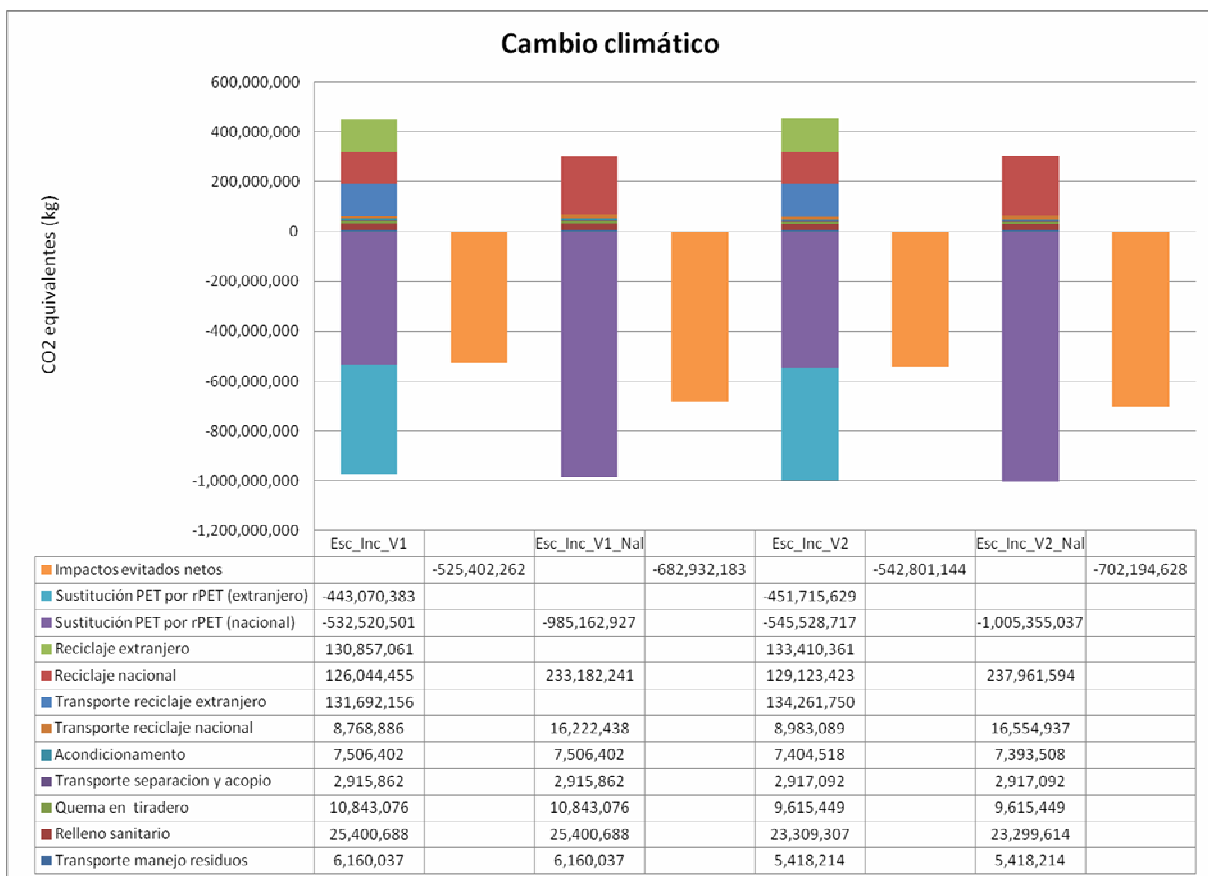


Fig. 21. Cambio climático, evaluación de escenarios

9.3.2 Agotamiento de recursos abióticos

En la evaluación de 4 escenarios con incremento de acopio-reciclaje, se determinó que existen ventajas ambientales de aproximadamente 42% para los escenarios de acopio-reciclaje mixtos (nacional/extranjero) y cerca del 57% para los escenarios de reciclaje nacional, esto es alrededor de **10 000 ton Sb Eq** evitadas en los escenarios (Esc_V1_Nal y Esc_V2_Nal) contra **6 660 ton Sb Eq** reportadas para el escenario actual. (Fig. 22).

En cuanto a las estrategias de acopio: incremento de la eficiencia del sistema de manejo de residuos (actividades de pre pepena, pepena y plantas de separación) en relación a los escenarios con incremento por programas de separación en la fuente, se observaron diferencias mínimas de aproximadamente 2% a favor del esquema de incremento de programas de separación.

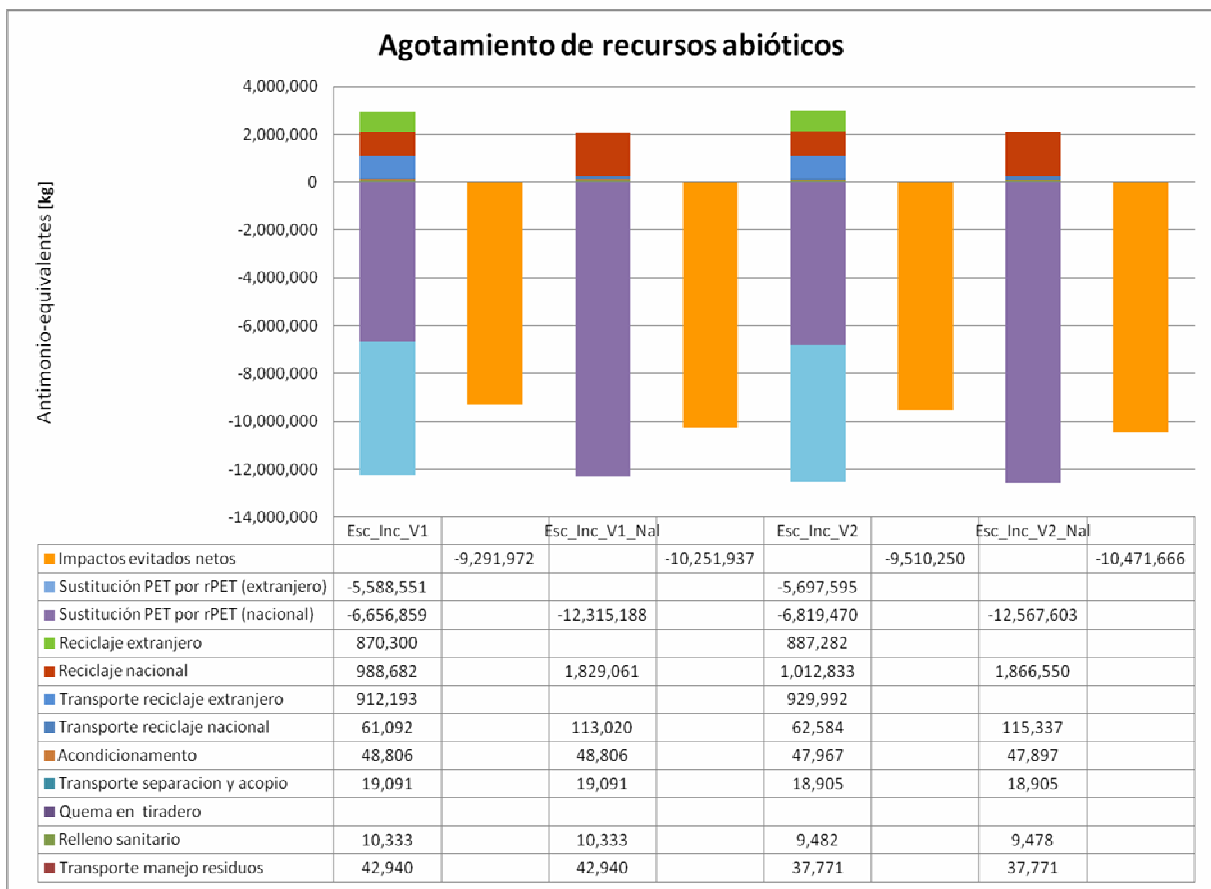


Fig. 22. Agotamiento de recursos abióticos, evaluación de escenarios

9.3.3 Agotamiento de la capa de ozono

Para la categoría de agotamiento de la capa de ozono los escenarios que ofrecen mayores beneficios ambientales corresponden a las dos versiones de reciclaje nacional, con aproximadamente 2 veces menos impactos que el esquema actual de reciclaje en México (**30 kg CFC-11 Eq** con respecto a **10 kg CFC-11 Eq** evitados en el escenario actual) y; cerca del 50% menos para las versiones de reciclaje mixtas (nacional/extranjero) correspondientes a los escenarios *Esc_V1* y *Esc_V2*. (Fig. 23).

En cuanto a las estrategias de acopio que corresponde al mejoramiento de la eficiencia del sistema de manejo y el incremento por programas de separación en la fuente; se observaron diferencias mínimas en cuanto al posible impacto ambiental por agotamiento de la capa de ozono de cerca del **3%** a favor del esquema de incremento de programas de separación.

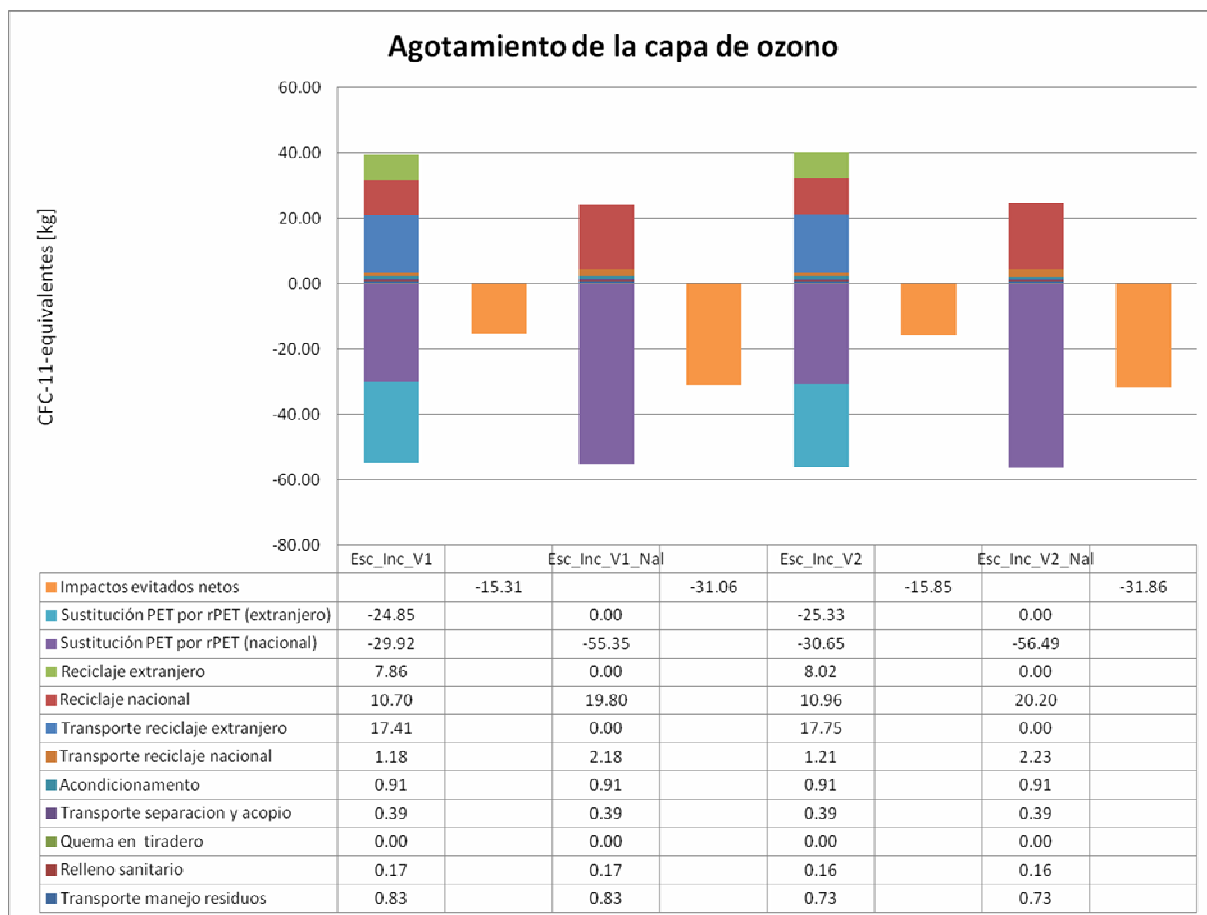


Fig. 23 Agotamiento de la capa de ozono, evaluación de escenarios

9.3.4 Eco toxicidad

De los 4 escenarios que favorecen el incremento de reciclaje, el esquema que ofrece mayores créditos ambientales en la categoría de eco toxicidad, corresponde a la versión 2 de reciclaje nacional con 24% menos impactos que el esquema actual de reciclaje en México (**951 465 ton 1,4 DCB Eq** en relación a **1 264 535 ton 1,4 DCB Eq**). En el caso de las versiones de reciclaje mixtas (nacional/extranjero) correspondientes a los escenarios *Esc_V1* y *Esc_V2*, presentan ventajas por impactos ambientales por eco toxicidad menores a **5%** con respecto al escenario actual. (Fig. 24).

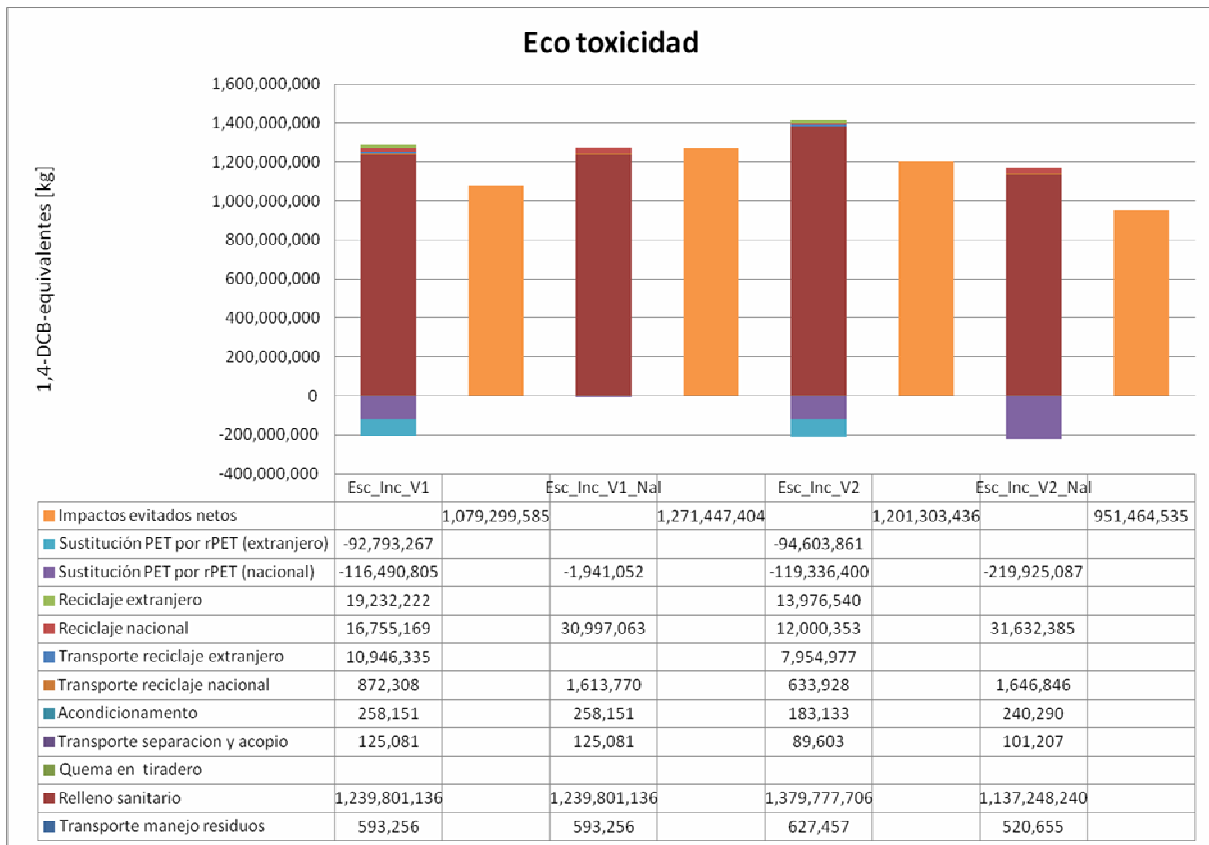


Fig. 24. Eco toxicidad, evaluación de escenarios

9.3.5 Eutrofización

De los 4 escenarios de incremento en el acopio-reciclaje, los esquemas que ofrecen mayores créditos ambientales corresponden a las dos versiones de reciclaje nacional (Esc_V1_Nal y Esc_V2_Nal) con cerca de 10 veces menos impactos por eutrofización, esto es aprox. **1400 ton NO_x Eq** evitados en relación a **150 ton NO_x Eq** emitidos en el esquema actual de reciclaje en México y; un incremento aproximado del 5% para la versión de reciclaje mixta (nacional/extranjero) del escenario *Esc_V1* (Fig. 25).

9.3.6 Acidificación

De los 4 escenarios de incremento de reciclaje, los esquemas que ofrecen mayores ventajas ambientales corresponden a las dos versiones de reciclaje nacional (Esc_V1_Nal y Esc_V2_Nal) con cerca de 4 veces menos emisiones (aprox. **1900 ton SO₂ Eq** en relación a **356 ton SO₂ Eq** evitadas) que el esquema actual de reciclaje en México y 49% menos para las versiones de reciclaje mixto (nacional/extranjero) correspondientes a los escenarios *Esc_V1* y *Esc_V2*. (Fig. 26).

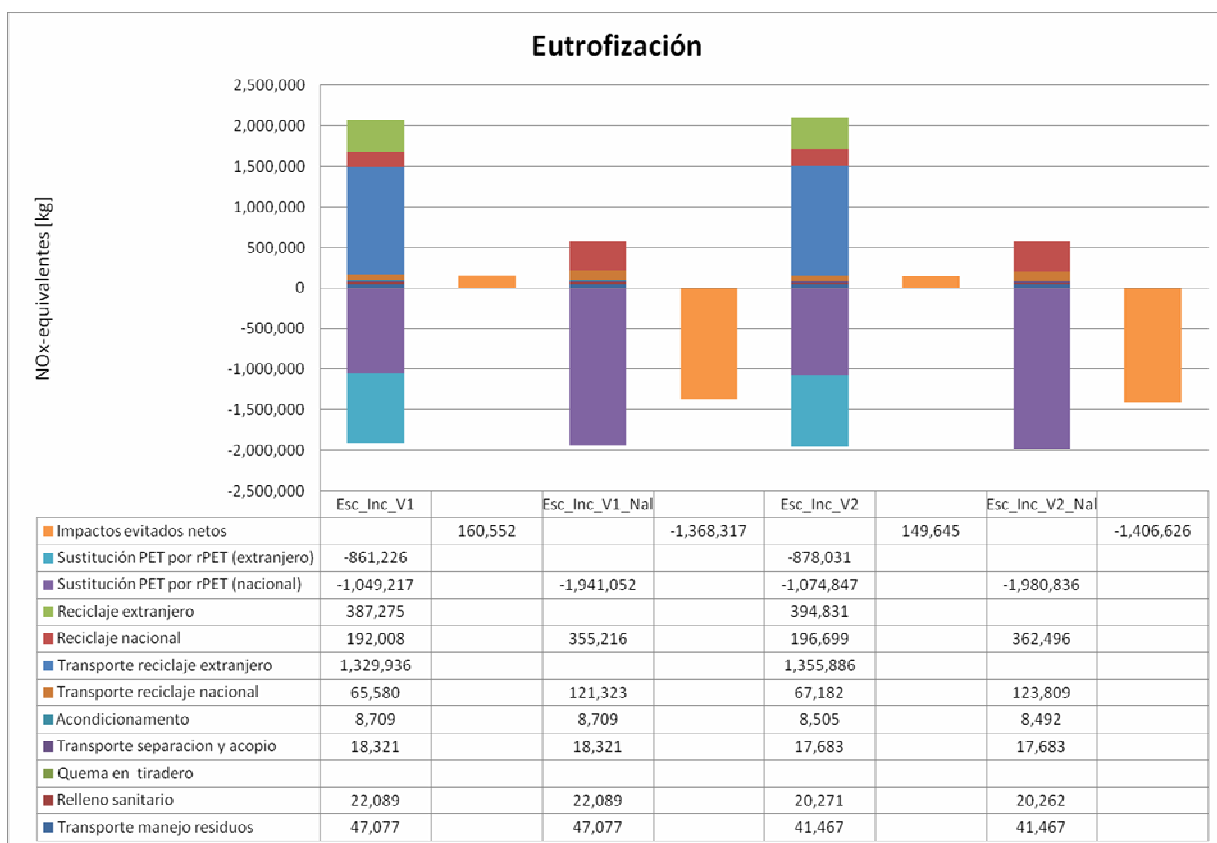


Fig. 25. Eutrofización, evaluación de escenarios

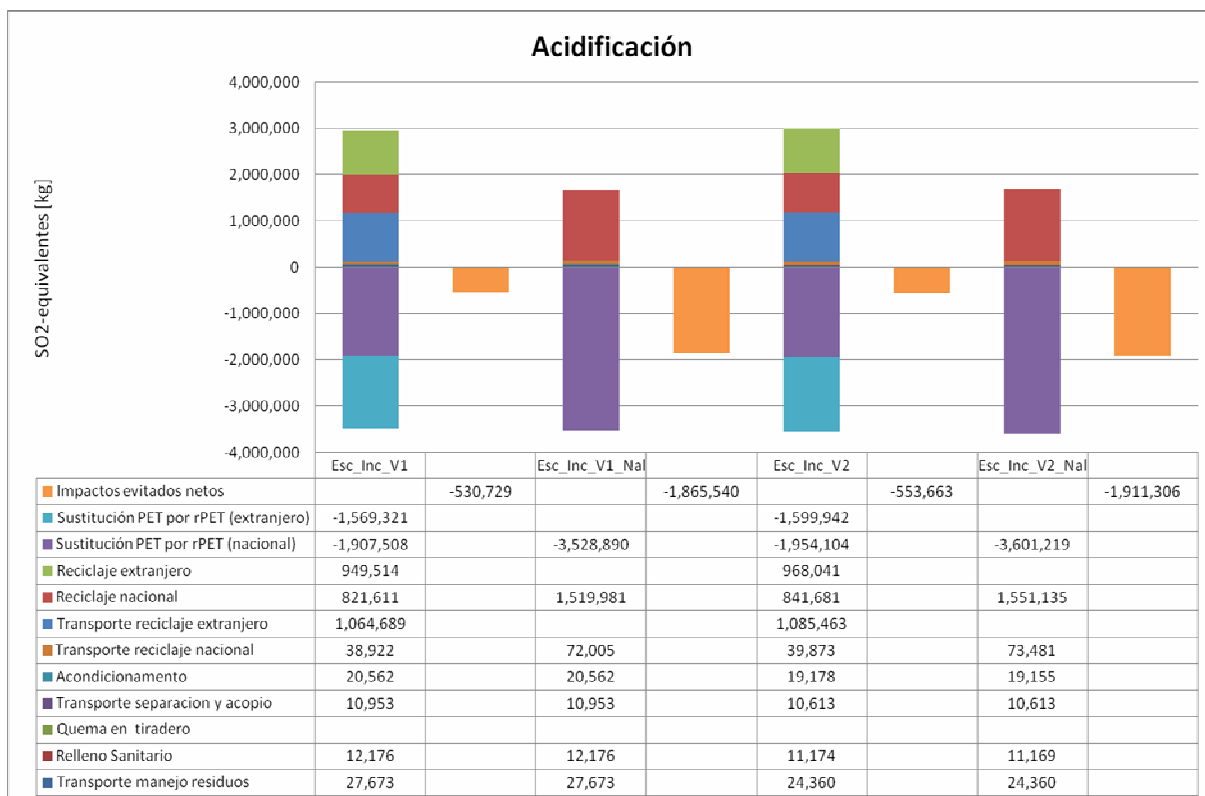


Fig. 26. Acidificación, evaluación de escenarios

En cuanto a las estrategias evaluadas para el incremento de acopio, mediante una mayor eficiencia del sistema de manejo de residuos y, el aumento de acopio por programas de separación en la fuente; se determinó una ventaja del **4%** para los esquemas de acopio por programas de separación sobre los esquemas de aumento de eficiencia de separación en el sistema de recolección.

10. Interpretación del ACV

Un ejercicio de interpretación de los hallazgos derivados de la modelación de los diferentes escenarios en las 6 categorías de impacto se presenta a continuación, nos resultando ser ello un análisis limitativo, sino más bien una interpretación enunciativa.

En ese sentido, se observó que el actual sistema de manejo de envases de bebidas de PET en México con respecto a un escenario sin valorización, presenta una reducción de emisiones del orden de entre 5 y 6 veces en las categorías de cambio climático, agotamiento de recursos abióticos, agotamiento de la capa de ozono y acidificación; lo cual se debe a los impactos ambientales evitados a partir de los créditos correspondientes a la sustitución de la resina PET virgen en el mercado por resina PET reciclada. En el caso específico de cambio climático la sustitución de resina PET virgen por rPET reporta una reducción de las emisiones de CO₂ eq. de **702,273 CO₂ ton.** Esto es claramente entendido debido a los esfuerzos actuales implementados en México para el aprovechamiento del material, que si bien el desarrollo de infraestructura para el reciclaje en México o el extranjero, tiene una carga ambiental, en suma resulta en un mejor comportamiento para el ambiente el aprovechar el recurso como material para sustituir materia virgen, esto debido al impacto ambiental de la extracción y procesamiento del PET virgen grado amorfo o alimenticio. Lo anterior, permite realizar una estimación cuantitativa de la ventaja ambiental de tomar una acción de valorización contra el no realizar ninguna acción.

Por otro lado, en la categoría de impacto de eco toxicidad, el esquema sin valorización reporta altas emisiones de 1,4 DCB Eq en la disposición final en relleno sanitario (**2 216 774 1,4 DCB Eq**). El esquema es mejorado por los procesos de valorización, sin embargo las etapas correspondientes a los transportes tanto nacional como en el extranjero, así como los procesos mismos de acondicionamiento y reciclaje contribuyen a disminuir las ventajas ambientales. Este comportamiento puede deberse a las complejas reacciones que ocurren en los sitios de disposición final, donde se liberan trazas de compuestos tóxicos persistentes que tienen como un factor de caracterización al DCB Eq., a partir de la descomposición de la mezcla de los residuos sólidos, que en el caso de los envases PET se presume que es un factor que contribuya a la eco-toxicidad en la corriente de los residuos.

En el caso particular de la eutrofización, el sistema de manejo-acopio-reciclaje presenta un incremento de los potenciales impactos ambientales de 33% con respecto al escenario sin valorización debido a las emisiones de NO_x Eq de los procesos de transporte para exportación (transporte marítimo a China). Otro factor que posiblemente influye a este comportamiento lo representa las operaciones de lavado del material PET, especialmente

cuando éste viene contaminado con materia orgánica, que tras su limpieza contribuye a aumentar la carga orgánica del agua de lavado que posteriormente es descargada en el sistema de alcantarillado.

Paralelamente, en la evaluación del escenario actual de acopio-reciclaje en México con la variante de reciclaje 100% en el país en relación al escenario base (Esc_Base), los resultados presentan beneficios importantes para las categorías de impacto de agotamiento de recursos abióticos, agotamiento de la capa de ozono y acidificación (8-15 veces) principalmente por los impactos evitados por el transporte de los materiales para reciclaje en el extranjero (transporte marítimo a China), esto especialmente por la reducción de distancias de transporte de manera importante cuando el PET se aprovecha el mercado mexicano respecto a su exportación, reduciendo significativamente el uso de combustible fósil. En el caso particular de la eutrofización, es importante hacer notar que el esquema de manejo de envases de bebidas de PET con vía reciclaje nacional presenta decrementos en los potenciales impactos ambientales en un orden de magnitud de cercana a 8 veces con respecto al escenario base.

Para todas las categorías evaluadas en el presente estudio, los esquemas de reciclaje nacional (Esc_V1_Nal y Esc_V2_Nal) reportan mayores beneficios ambientales por carga evitada respecto al escenario de exportación, principalmente en la etapa de transporte para reciclaje en el extranjero, existiendo también diferencias tecnológicas y operativas en los procesos de reciclaje en México y China, además de las diferencias en los procesos de obtención de energía eléctrica.

En cuanto a las diferencias entre los esquemas de acopio (vía separación en la fuente o aumento de la eficiencia de separación del sistema de manejo de residuos), existen ventajas discretas a favor del aumento de acopio mediante esquemas de separación en la fuente como programas de separación.

11. Observaciones de la Evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV)

En el presente estudio las ventajas ambientales por reciclaje radican en la sustitución de materia prima virgen por materia prima reciclada, por lo que los resultados se basan en los supuestos de que el PET reciclado (con calidad de grado amorfo y grado botella uso alimenticio) sustituyen una demanda en el mercado de resina PET virgen para lámina, fibra, botella grado no alimenticio y grado alimenticio; y no, a la introducción al mercado de nuevos materiales y productos.

Para la categoría de eco toxicidad se deber considerar que el modelo empleado para relleno sanitario corresponde a un modelo desarrollado para el caso europeo y que debería ser revisado y ajustado a la realidad latinoamericana.

Es necesario tomar en cuenta que las distancias estimadas en el modelo de transporte de reciclaje nacional, considera el esquema de acopio y reciclaje de envases de botellas de PET tomando como base información de la ZMVM. Sin embargo, la dinámica del mercado muestra una tendencia al aumento de las distancias de transporte por compras de PET pos-consumo al Interior de la República para reciclaje en la ZMVM (Tabla 14); factor que se presume incrementaría los potenciales impactos ambientales por transporte para los escenarios de reciclaje nacional.

Tabla. 14. Distribución porcentual del origen de compras de envases pos-consumo para reciclaje en la ZMVM

Origen	% de compras de envases PET pos-consumo
Edo. de Mex. / D.F.	56.1
Michoacán	24.0
Yucatán	11.2
Nuevo León	4.6
Tabasco	3.0
Puebla	0.4
Guanajuato	0.4
Chiapas	0.3

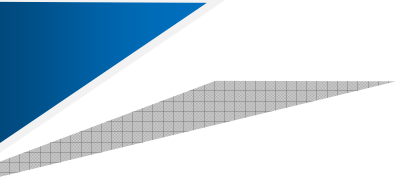
En el presente estudio no se observaron diferencias importantes en los impactos ambientales producidos por los esquemas de separación en la fuente (Programas de separación) y el aumento de la eficiencia de separación en el sistema de recolección (Plantas de separación, pre pepena en el sistema de recolección y pepena en sitios de disposición final: tiraderos a cielo abierto y sitios controlados), por lo que será importante realizar un análisis de sensibilidad que permita determinar los efectos en los resultados con respecto a la variación de los datos.

12. Conclusiones de la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

En base al análisis de los hallazgos de la modelación, así como de los supuestos previamente establecidos, se concluye que las acciones actuales para la valorización de las botellas PET pos-consumo, representan ventajas ambientales respecto a no haber realizado ninguna acción de aprovechamiento o valorización. En ese sentido se observó una reducción de impactos ambientales al cambio climático, agotamiento de recursos abióticos, agotamiento de la capa de ozono y acidificación entre 500% - 600% con respecto a esquemas sin valorización.

Otro aspecto importante del estudio, fue verificar como mejorar el desempeño ambiental del actual esquema de reciclaje, por lo que se definieron diferentes escenarios de valorización (Esc_V1, Esc_V1_Nal, Esc_V2, Esc_V2_Nal), donde se observaron ventajas importantes por impactos ambientales evitados en las seis categorías de impacto evaluadas. Por otro lado, se presentan ventajas ambientales potenciales en todos los esquemas de incremento de reciclaje nacional sin exportación para reciclaje en el extranjero, esto es debido a las emisiones evitadas correspondientes al transporte marítimo.

Se confirma por lo tanto, que los esquemas de acopio y reciclaje de PET en México presentan ventajas ambientales importantes por la sustitución de resinas vírgenes en el mercado. Los esquemas de acopio y reciclaje mejoran la eficiencia del uso de los



recursos naturales y disminuyen las emisiones generadoras de potenciales de impactos ambientales. En cuanto a los esquemas de acopio, por aumento de separación en la fuente (programas de separación) y aumento de la eficiencia de separación en el sistema de recolección (pre pepena, pepena y plantas de separación) se determinaron diferencias mínimas a favor de los esquemas de separación en la fuente. Finalmente, se presentan resultados importantes que favorecen el reciclaje nacional por sobre los esquemas de reciclaje nacional-extranjero, por los impactos ambientales correspondientes a la transportación (exportación) del material por la vía marítima.

Dado lo anterior, se recomienda, establecer mecanismos de política pública que favorezcan el mejoramiento de los sistemas de valorización de la botella PET pos-consumo, especialmente favoreciendo su reciclaje en el mercado nacional. Para tal efecto es importante explorar algunos mecanismos y estrategias, tales como: Que las exportaciones cumplan con los mismos requisitos fiscales que las ventas domésticas (Comprobante Fiscal Digital - CFDI); esquemas de fomento para el desarrollo de empresas dedicadas al reciclaje; y esquemas de fomento al uso de materiales reciclados, con el objeto de incrementar su incorporación en la fabricación de productos nuevos, por mencionar algunos. Así como, implementar medidas que se orienten a mejorar su separación en la fuente y acopio, a través de acciones de colaboración con el sector privado y los Municipios, y la implementación de programas de concientización y educación ambiental, que se orienten a un aprovechamiento eficiente del recurso.

Finalmente, Los resultados del presente estudio, constituyen una base técnica y científica del desempeño ambiental de la corriente de residuos de envases para bebidas de PET, que podrán ser empleados en conjunto con otros estudios transversales económicos y/o sociales, para el establecimiento de estrategias locales o regionales de reciclaje que garanticen el cumplimiento de los objetivos del desarrollo sustentable, maximizando el uso de los recursos naturales y energéticos y minimizando los potenciales impactos ambientales y sociales con consideraciones de uso eficiente de los recursos económicos.

Agradecimientos

Agradecimiento a las siguientes asociaciones, empresas y consultores que aportaron valiosos datos e información para la integración de este estudio:

- ANIQ, Asociación Nacional de la Industria Química
- ANIPAC, Asociación Nacional de Industrias del Plástico
- AMEE, Asociación Mexicana de Envases y Embalajes
- ALPLA México S.A. de C.V.
- ANPRAC, Asociación Nacional de Productores de Refrescos y Aguas Carbonatadas A.C.
- ASCOCA, Asociación de Embotelladoras mexicanas de Coca Cola A.C.
- ECOCE S.A. de C.V.
- Empaque Sustentable Coca Cola de México
- IMER, Industria Mexicana de Reciclaje, S.A. de C.V.
- PETSTAR S.A. de C.V.
- Tecnología del Reciclaje
- Mtra. Arq. Elvira Schwanse
- MVZ. Rolando Mendoza Úrsulo
- M. en I. Alejandra Medina Arévalo

Agradecimiento especial al apoyo técnico del **INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE DE HEIDELBERG, ALEMANIA (IFEU)**

- Jürgen Giegrich
- Andreas Detzel
- Cassandra Derreza-Greeven

Referencias

NORMAS MEXICANAS OFICIALES, LEYES Y PROGRAMAS

- IMNC, A.C. NMX-SAA-14040-IMNC-2008, Gestión Ambiental- Análisis del ciclo de vida- Principios y marco de referencia. pp. 23. 2007. México.
- IMNC, A.C. NMX-SAA-14044-IMNC-2008, Gestión Ambiental- Análisis del ciclo de vida- Requisitos y directrices. pp. 52. 2009. México.
- SEMARNAT. LGPGIR (2003), Ley General Prevención y Generación Integral de Residuos. pp. 210. pp. 170. México.
- SEMARNAT. PNPGR, Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2008-2012. 2008. México.

DATOS PARA LA CONFORMACION DE DIRECTORIOS DE ACTORES INVOLUCRADOS

- Arca Continental, S.A.B. de C.V. Reporte Anual. pp. 229. 2010. México.
- Directorio ANIQ, Asociación Nacional de la Industria Química. pp. 303. 2011. México.
- GEUSA, S.A. de C.V. Informe anual 2010, GEUSA 06. pp. 130. 2010. México.

ESTUDIOS, GUIAS Y MANUALES DE ANALISIS DE CICLO DE VIDA

- IFEU. 2009. Life Cycle Assessment of waste bags. Reporte Final. Germany
- Life cycle assessment of pet bottle. 2008. Dokuz Eylul University Graduate School of Natural and Applied Sciences.
- McDougall, F. 2004. Gestión Integral de Residuos Sólidos. Inventario de Ciclo de Vida. P&G. Inglaterra, Reino Unido. pp. Varias.
- Planificación de la gestión de residuos y optimización. 2005. Manual para el pronóstico de residuos municipales y la evaluación de la sostenibilidad de los sistemas de gestión de residuos.
- Ramos, R. 2004. Ciclo de Vida de Envases de Bebida en México. 15 de noviembre de 2004. Informe Final. México.
- Referencia Internacional de Ciclo de Vida, datos del sistema (ILCD). 2009. Manual: Documento de Orientación general para la Evaluación del Ciclo de Vida (ACV). Programa de consulta pública.
- Suppen N. 2004. Inventario de Ciclo de Vida en México (LCI Initiative). Ponencia DGCENICA. México, 2004.
- Schwanse E. 2010. Estudio de suministro de PET. IMER. octubre de 2010.
- Schwanse E. 2011. Recycling policies and programmes for pet drink bottles in Mexico. Waste Management Res. Septiembre. 29 (9). Pp 973- 981.

DATOS ESTADISTICOS DE LA PRODUCCION DE RESINAS PARA LA PRODUCCIÓN DE PET-VIRGEN

- ANPRAC. 2008. La industria de refrescos y aguas carbonatadas en 2008. Asociación Nacional de Productores de Refrescos y Aguas Carbonatadas. A.C. ANPRAC. México.
- Asociación Nacional de la Industria Química, A. C. CD Anuario. 2011. México.
- Asociación Nacional de Industria del Plástico. CD Anuario Estadístico. 2012. México.
- Petróleos Mexicanos. 2010. Memoria de labores. México.
- Petróleos Mexicanos. 2010. Anuario Estadístico. México.

ESTUDIOS SOBRE PET EN EL SISTEMA DE MANEJO DE RESIDUOS

- ECOCE. 2011. Estimaciones de reciclaje de PET en México. Presentación PowerPoint.08 de diciembre de 2011.
- ECOCE. 2012. Informe Decimo Aniversario.
- Galván Meras F. J. 2008. Prontuario sobre legislación en México. Ed. Arlequín, México, D. F.
- GDF. 2001. El PET y su situación actual en el Distrito Federal. Secretaria de Medio Ambiente. Dirección de Proyectos de Agua, Suelo y Residuos.
- IMER. 2010. Estudio de suministro del PET IMER. Octubre 2012.
- SEMARNAT. 2006. Diagnostico para la Gestión Integral de los Residuos.
- SEMARNAT-INECC. 2012. Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2012. México.
- Sucedo, G. 2009. Informe Final: Estudio para actualizar la composición y generación de los residuos sólidos urbanos en el Distrito Federal (2006-2008). Caso de las estaciones de transferencia de Benito Juárez, Central de abastos, Iztapalapa y Venustiano Carranza y Planta de Selección de San Juan de Aragón. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. Departamento de Biotecnología. septiembre de 2009.
- Tovar- Gálvez, L. 2009. Estudio para actualizar la composición y generación de los residuos sólidos urbanos en el Distrito Federal. I. Cinco estaciones de transferencia y una planta de selección, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación y Estudio sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Octubre de 2009.
- UNAM. 2009. Estudio para actualizar la composición y generación de los residuos sólidos urbanos en el Distrito Federal. Instituto de Ingeniería UNAM. D. F. Marzo 2009.

DATOS DE ENERGIA

- Balance Nacional de Energía. 2010. Secretaria de Energía. SENER.
- Quinto Informe de Labores. 2011. Secretaria de Energía. SENER.
- Sistema de Cuentas Nacionales de México (SCNM). 2003. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Indicador estatal mensual de la electricidad 2003-2011.

GUIAS PARA DETERMINAR LAS CATEGORIAS DE IMPACTO

- Abrahamsen G. 1984. Effects of acidic deposition on forest soils and vegetation. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1984.
- Bareham S.A. 1996. Acid deposition and soils: a perspective for nature conservation. Taylor, A.G., Gordon, J.E. and Usher, M.B. (Eds) Soils, Sustainability and the Natural Heritage. HMSO, Edinburgh, pp. 105-120.
- Baumann, H. 2004. Baumann Henrikke, Tillman Anne-Marie. The Hitch hiker's Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology an application. United States of America, 2004.
- COMIA. 2003. Comisión Mexicana de Infraestructura Ambiental- Agencia de Cooperación Técnica Alemana, La basura en el Limbo. México.
- Chapman, K.T. Ho, W.R. Munns, K. Solomon and M.P. Weinstein. 2002. Issues in sediment toxicity and ecological risk assessment. Mar. Pollut. Bull.
- IPCC. Climate Change. 2007. The Physical Science Basis. WGI Contribution to the the Foruth assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2007.
- Giovanni Libralato, Volpi, Ghirardini Annamaria and Avezzù Francesco. 2010. How toxic is toxic? A proposal for wastewater toxicity hazard assessment. Environmental Sciences Department, University of Venice Cà Foscari. Campo della Celestia 2737/b, I-30122 Venice, Italy, 5 July.

- Rodríguez Lepure Ana L. 2008. Gestión Local e intergubernamental de los Residuos Sólidos Urbanos. Tijuana, B. C. México. pág. 158.
- SEMARNAT. 2009. Cambio Climático. Ciencia, evidencia y acciones. México, 2009.
- SEMARNAT-GTZ. 2006. Una propuesta para la gestión ambiental municipal de los residuos sólidos.
- SEMARNAT. 2009. Agenda Nacional Ciudadana para la Prevención y Gestión Integral de Residuos.
- Stumm, W and JJ Morgan. 1981. Aquatic Chemistry. Introduction emphasizing chemical equilibria en natural water. 2a edition. Wiley, M New York, NY, US.
- Taylor, F.T. 2005. Elementary Climate Physics Oxford UP.

REFERENCIAS INTERNET

- SCT. Administración Portuaria Integral de Manzanillo. Distancias de exportación. 2012. México. <http://www.puertomanzanillo.com.mx/esps/0021103/ru>.
- U.S. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Inventarios. 2012. E.U.A. <https://www.lcacommons.gov/nrel/>.
- SE. PROMÉXICO. Modelos de exportación. 2012. México. http://www.promexico.gob.mx/es_mx/promexico/home
- SeaRates LP. Puertos de exportación. 2012. Internacional. <http://www.searates.com/reference/portdistance/?country1=199&country2=127&fcity1=22762&fcity2=751&speed=14>.
- SENER. Sistemas de Información Energética. 2012. México. <http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController>

OTROS DOCUMENTOS Y RECURSOS

- INE-GIZ. 2012. Diagnóstico de la situación actual y análisis de factibilidad de posibles instrumentos económicos para envases de PET pos-consumo en México.
- SINGIR. 2012. Sistema de Información Nacional para la Gestión de los Residuos, Base de datos estadísticos, Consulta temática, SEMARNAT (2012).

Anexo 1 Formato de recopilación de inventario, Hoja 1

HOJA 1 DE RECOPIACIÓN DE INVENTARIO ESTUDIO DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE ENVASES DE BEBIDAS DE POLIETILEN TEREFALATO (PET) EN SU FASE POS-CONSUMO		DATOS PRIMARIOS, INSUMOS Y PRODUCTOS DE PROCESO		
		No. _____ FECHA: _____		EMPRESA
		RECOPILO: _____		
INSUMOS MATERIALES DE PROCESO PRODUCTIVO	PUNTO DE CONSUMO Y NOMBRE DEL BLOQUE DEL DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO	INSUMO NOMBRE COMERCIAL/QUÍMICO	CONSUMO ANUAL	
			CANTIDAD	UNIDAD
INSUMOS MATERIALES DE SERVICIOS AUXILIARES				
INSUMOS ENERGÉTICOS	AREA DE CONSUMO	TIPO DE COMBUSTIBLE	CONSUMO ANUAL	
	PROCESO PRODUCTIVO			
	SERVICIOS AUXILIARES			
	AUTOGEN. ENERGÉTICA			
PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS	CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN INSTALADA	PRODUCTO NOMBRE COMERCIAL/QUÍMICO	PRODUCCIÓN ANUAL	
			CANTIDAD	UNIDAD

Anexo 2 Formato de recopilación de inventario, Hoja 2

HOJA 2 DE RECOPIACIÓN DE INVENTARIO ESTUDIO DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE ENVASES DE BEBIDAS DE POLIETILEN TEREFALATO (PET) EN SU FASE POS-CONSUMO		DATOS PRIMARIOS, EMISIONES DE PROCESO No. _____ FECHA: _____ RECOPILO: _____ EMPRESA _____			
EMISIONES A LA ATMÓSFERA	NOMBRE DEL BLOQUE DEL PUNTO DE EMISIÓN*	CONTAMINANTE	EMISIÓN ANUAL		
			CANTIDAD	UNIDAD	METODO DE ESTIMACIÓN
		Bióxido de azufre (SO ₂)			
		Óxidos de Nitrógeno (NO _x)			
		Partículas suspendidas Totales (PST)			
		Monóxido de Carbono (CO ₂)			
		Bióxido de Carbono (CO)			
		Partículas PM-10 (PM ₁₀)			
		Hidrocarburos totales (HCT)			
	Compuestos orgánicos volátiles (COVs)				
	Otros (especifique)				
EMISIONES EN DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES	PARÁMETRO		EMISIÓN ANUAL		
			CANTIDAD	UNIDAD	METODO DE ESTIMACIÓN
		Grasas y aceites			
		Sólidos suspendidos totales			
		Arsénico total			
		Cadmio total			
		Cianuro total			
		Cobre total			
		Cromo hexavalente			
		Fósforo total			
		Mercurio total			
		Níquel total			
		Nitrógeno total			
		Plomo total			
	Zinc total				
	Otros				
GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS	CLAVE DE IDENTIFICACIÓN DEL RESIDUO		GENERACIÓN ANUAL		
			CANTIDAD	UNIDAD	MÉTODO DE ESTIMACIÓN

Anexo 3 Categorías de impacto

Categoría de impacto	Resultados del ICV	Modelo de caracterización	Indicador de la categoría	Factor de caracterización	Unidades
Cambio Climático (Calentamiento Global)	Emisiones de gases de efecto invernadero al aire (en Kg)	Modelo desarrollado por el IPCC definiendo el potencial de calentamiento global de diferentes gases de efecto invernadero	Fuerza radiativa infrarroja (W/m^2)	Potencial de Calentamiento Global (GWP) para un horizonte de tiempo de 100 años (GWP 100) para cada emisión de gas de efecto invernadero al aire (en Kg equivalentes de CO_2 /Kg de emisión)	Kg (CO_2 equivalentes)
Agotamiento de recursos abióticos	Extracción de minerales y combustibles fósiles (en Kg)	Basado en la concentración – reservas base y razón de acumulación	Agotamiento de las últimas reservas en relación al uso anual	Potencial de agotamiento de recursos abióticos (ARDP) para la extracción de minerales y combustibles fósiles (en Kg equivalentes de antimonio (Sb)/Kg de extracción)	Kg (Sb equivalentes)
Agotamiento del ozono estratosférico (Agotamiento de la capa de ozono)	Emisiones al aire de gases que agotan el ozono (en Kg)	Modelo desarrollado por la Organización Meteorológica Mundial, definiendo el potencial de agotamiento de ozono de diferentes gases	Deterioro del ozono estratosférico	Potencial del Agotamiento de Ozono (ODP) en estado estacionario, para cada emisión al aire (en Kg equivalentes de CFC-11/Kg de emisión)	Kg (CFC⁻¹¹ equivalentes)
Eco toxicidad	Emisiones de sustancias tóxicas al aire, agua y suelo (en Kg)	Modelo USES 2.0 desarrollado como RIVM, describiendo el destino, exposición y efectos de sustancias tóxicas	Concentración ambiental prevista / concentración prevista de ningún efecto	Potencial de Eco toxicidad Acuática (AETP) para cada emisión de una sustancia tóxica al aire, agua y/o suelo (en Kg equivalentes de 1,4-diclorobenceno/Kg de emisión)	kg (1,4-DCB equivalentes)
Eutrofización	Emisiones de nutrientes al aire, agua y suelo (en Kg)	Procedimiento estequiométrico, el cual identifica el equivalente entre N y P para sistemas acuáticos y terrestres	Deposición de N / P equivalentes en biomasa	Potencial de Eutrofización (EP) para cada emisión eutroficante al aire, agua y suelo (en Kg equivalentes de PO_4 /Kg de emisión)	Kg (PO_4 equivalentes)
Acidificación	Emisión de sustancias acidificantes al aire (en Kg)	Modelo RAINS10, desarrollado en IIASA, describiendo el destino y deposición de las sustancias acidificantes	Depósito / carga crítica de acidificación	Potencial de acidificación (AP) para cada emisión acidificante al aire (en Kg equivalentes de SO_2 /Kg de emisión)	Kg (SO_2 equivalentes)