



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS**

**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE
BILLETES MEXICANOS DE POLÍMERO Y PAPEL DE ALGODÓN DE ALTA
DURABILIDAD**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

I.Q. CLAUDIA CRISTINA LUJÁN ORNELAS

TUTOR PRINCIPAL

**DRA. LEONOR PATRICIA GÜERECÁ HERNÁNDEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM**

COMITÉ TUTOR

**DR. JAVIER EDUARDO AGUILLÓN MARTÍNEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM**

**DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA**

MÉXICO, D. F. JULIO 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES

Secretario: DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ

Vocal: DR. URIEL MANCEBO DEL CASTILLO STERNENFELS

1^{er.} Suplente: DR. JAVIER EDUARDO AGUILLÓN MARTÍNEZ

2^{d o.} Suplente: DRA. LEONOR PATRICIA GÜERECA HERNÁNDEZ

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DRA. LEONOR PATRICIA GÜERECA HERNÁNDEZ

FIRMA

*Sólo se puede decir que estamos vivos en
esos momentos cuando nuestros corazones
están conscientes de nuestros tesoros.*

- Thornton Wilder

*Gracias a tí por estar siempre a mi lado,
por tu sonrisa, por tu apoyo, amor y
compañía y gracias a Dios por tan
maravilloso regalo.*

- Cris

INDICE

Índice de tablas	VII
Índice de figuras	VIII
Resumen	X
Agradecimientos	XII
Capítulo 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	3
1.2 Pregunta de investigación	7
1.3 Hipótesis	7
1.4 Objetivo	7
1.4.1 Objetivo específico	7
Capítulo 2	8
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 Historia del billete	8
2.2 Los billetes mexicanos a través de la historia	9
2.2.1 Creación del Banco Central Mexicano	11
2.2.2 Billetes impresos por la fábrica del Banco de México	12
2.2.3 Serie actual de billetes del Banco de México	15
2.3 Desempeño ambiental de billetes	15
2.4 El billete en la actualidad	16
2.4.1 Tipos de sustratos para la fabricación de billetes	16
2.4.2 Billeto de algodón	17
2.4.3 Billeto de polímero	18
2.4.4 Fabricación de tintas de impresión	24
2.4.5 Proceso de fabricación de los billetes del Banco de México	25
2.4.6 El billete de polímero en México	27
2.5 Análisis de Ciclo de Vida	30
2.5.1 Etapas de ACV	31
2.5.2 Antecedentes de ACV	33
2.5.3 Acerca de ISO	33
2.5.4 Estado del ACV a nivel internacional	35
2.6 El Análisis del Ciclo de Vida de billetes en el mundo	40
2.6.1 Banco de la Reserva Australiana	41
2.6.2 Banco de Suiza (BNS)	43
2.6.3 Banco Central Europeo (BCE)	44
2.6.4 Banco de Canadá	45
2.6.5 Banco de Inglaterra	48
2.6.6 Banco de la Reserva India	51
2.6.7 Otros estudios de viabilidad para el billete de polímero	51
	IV

Capítulo 3 **57**

3. METODOLOGÍA **57**

3.1	Definición de objetivos y alcance.....	57
3.1.1	Objetivo de ACV de billetes de México.....	57
3.1.2	Función del sistema	57
3.2	Límites del sistema.....	57
3.2.1	Límites temporales	59
3.2.2	Límites geográficos	59
3.2.1	Límites tecnológicos.....	59
3.3	Unidad funcional	61
3.4	Metodología para la evaluación de impacto.....	62
3.4.1	Elección de categorías de impacto e indicadores.....	62
3.4.2	Modelos de caracterización	67
3.5	Software utilizado.....	80
3.6	Criterios de corte	81
3.7	Calidad de datos	81
3.8	Procedimiento de recopilación de datos	81
3.9	Consideraciones del estudio	82

Capítulo 4 **83**

4. ANALISIS DEL INVENTARIO **83**

4.1	Descripción de etapas de ciclo de vida.....	89
4.1.1	Extracción de materia prima para sustratos	92
4.1.2	Fabricación de sustrato	92
4.1.3	Extracción y producción de materias primas.....	93
4.1.4	Extracción y producción de empaques	93
4.1.5	Importación de materias primas.....	94
4.1.6	Impresión de billete	94
4.1.7	Distribución	95
4.1.8	Circulación o etapa de uso.....	95
4.1.9	Procesamiento de billetes	96
4.1.10	Disposición final de residuos de producción	96
4.1.11	Disposición final de billete destruido	98

Capítulo 5 **99**

5. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA **99**

5.1	Cambio climático.....	100
5.2	Reducción de capa de ozono	101
5.3	Formación de oxidantes fotoquímicos.....	102
5.4	Acidificación terrestre	103
5.5	Toxicidad humana	104

5.6	Eutrofización de agua dulce	105
5.7	Ecotoxicidad terrestre.....	106
5.8	Ocupación de suelo agrícola.....	107
5.9	Agotamiento de agua.....	108
5.10	Agotamiento de recursos minerales.....	109
5.11	Agotamiento de combustibles fósiles.....	110
5.12	Impacto global caracterizado.....	111
 Capítulo 6		114
6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD		114
6.1	Análisis de sensibilidad variando tiempo de vida útil	114
6.2	Análisis de sensibilidad incluyendo cajeros automáticos.....	119
6.2.1	Cambio climático.....	124
6.2.2	Agotamiento de combustibles fósiles	125
6.2.3	Agotamiento de recursos minerales.....	126
6.2.4	Ocupación de suelo agrícola.....	127
6.2.5	Ecotoxicidad terrestre	128
6.2.6	Agotamiento de agua	129
 Capítulo 7		130
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		130
7.1	Conclusiones	130
7.2	Recomendaciones.....	131
 REFERENCIAS		133
 ANEXO 1		144

Índice de tablas

Tabla 2.1 Países que utilizan polímero en sus billetes en circulación.....	20
Tabla 2.2 Normas ISO 14000.....	34
Tabla 2.3 Unidad funcional utilizada en ACV del Banco de Canadá	46
Tabla 2.4 Flujos de referencia utilizados por el Banco de Inglaterra para el ACV billetes	49
Tabla 2.5 Resumen comparativo de los ACV de billetes.....	53
Tabla 3.1 Unidad funcional de ACV de billetes de México.....	62
Tabla 3.2 Categorías de impacto y factores de caracterización según ReCiPe v1.08	64
Tabla 3.3 Potenciales de Calentamiento Global relacionados con el CO ₂	68
Tabla 4.1 Procesos incluidos en el ciclo de vida del billete impreso en papel AD	83
Tabla 4.2 Procesos incluidos en el ciclo de vida del billete impreso en polímero	86
Tabla 4.3 Unidad funcional y unidad de referencia	89
Tabla 4.4 Inventario de ciclo de vida para el billete de papel AD	90
Tabla 4.5 Inventario de ciclo de vida para el billete de polímero	91
Tabla 4.6 Datos utilizados para la etapa de extracción de materia prima para sustrato	92
Tabla 4.7 Cálculos realizados en la etapa de producción de papel AD 1	92
Tabla 4.8 Cálculos realizados en la etapa de producción de papel AD 2.....	93
Tabla 4.9 Datos utilizados en la etapa de distribución de billetes.....	95
Tabla 4.10 Datos utilizados en la etapa de procesamiento de billetes.....	96
Tabla 4.11 Datos utilizados en la etapa de disposición final de residuos de producción.....	97
Tabla 4.12 Datos utilizados en el escenario de disposición final de billete en relleno sanitario.....	98
Tabla 5.1 Etapas de ciclo de vida del estudio de billetes mexicanos	99
Tabla 5.2 Contribución porcentual por proceso unitario. Sustrato de papel AD.....	112
Tabla 5.3 Contribución porcentual por proceso unitario. Sustrato de polímero.....	112
Tabla 5.4 Impacto total generado por unidad funcional.....	113
Tabla 6.1 Tiempo de vida útil de los billetes papel AD y polímero establecidos para el análisis de sensibilidad.....	115
Tabla 6.2 Contribución de los escenarios de vida útil a cada categoría de impacto en valores totales	116
Tabla 6.3 Datos asociados a la etapa de uso del billete.....	120
Tabla 6.4 Contribución de los escenarios ATM a cada categoría de impacto en valores totales....	121
Tabla 6.5 Etapas de mayor impacto en cada categoría, incluyendo ATM's	123

Índice de figuras

Figura 2.1 Billete Ming (22x34 cm), 1375.....	8
Figura 2.2 Piezas de cartón emitidas en 1813.	9
Figura 2.3 Primera emisión oficial de billetes mexicanos.....	10
Figura 2.4 Billetes mexicanos emitidos por bancos privados.	10
Figura 2.5 Serie de billetes mexicanos impresos por American Bank Note Company	11
Figura 2.6 Primeros billetes del Banco de México, impresos por American Bank Note Company	12
Figura 2.7 Serie de billetes tipo A.....	13
Figura 2.8 Serie de billetes tipo B	13
Figura 2.9 Serie de billetes tipo C	14
Figura 2.10 Serie de billetes tipo D.....	14
Figura 2.11 Serie de billetes tipo D1	14
Figura 2.12 Serie de billetes tipo F.....	15
Figura 2.13 Anverso del primer billete de polímero en el mundo.....	19
Figura 2.14 Reverso de primer billete de polímero en el mundo	19
Figura 2.15 Fases de un Análisis de Ciclo de Vida.....	31
Figura 2.16 Indicadores y resultados del ACV del Banco Central Europeo.	44
Figura 2.17 Diagrama de bloques del proceso de fabricación de los billetes canadienses.....	46
Figura 3.1 Metodología realizada.....	57
Figura 3.2 Límites del sistema de ACV de billetes de México	58
Figura 3.3 Diagrama de proceso Banco de México	60
Figura 5.1 Contribuciones a la categoría de cambio climático, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.	100
Figura 5.2 Contribuciones a la categoría de reducción de capa de ozono, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.	101
Figura 5.3 Contribuciones a la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.	102
Figura 5.4 Contribuciones a la categoría de acidificación terrestre, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.	103
Figura 5.5 Contribuciones a la categoría de toxicidad humana, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.	104
Figura 5.6 Contribuciones a la categoría de eutrofización de agua dulce, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.	105
Figura 5.7 Contribuciones a la categoría de ecotoxicidad terrestre, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.	106
Figura 5.8 Contribuciones a la categoría de ocupación de suelo agrícola, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario	107
Figura 5.9 Contribuciones a la categoría de agotamiento de agua, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario	108
Figura 5.10 Contribuciones a la categoría de agotamiento de recursos minerales, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario	109

Figura 5.11 Contribuciones a la categoría de agotamiento combustibles fósiles, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario	110
Figura 5.12 Impactos ambientales caracterizados de los dos sistemas analizados: papel AD y polímero.	111
Figura 5.13 Contribución relativa de los procesos unitarios que conforman los escenarios papel AD y polímero.....	111
Figura 6.1 Comparación de los diferentes escenarios de tiempo de vida útil.	116
Figura 6.2 Contribuciones a la categoría de agotamiento de recursos fósiles, valores totales por escenario.....	117
Figura 6.3 Contribuciones a la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, valores totales por escenario	117
Figura 6.4 Comparación del Papel AD y Polímero con tiempo de vida útil 33.75 meses.	118
Figura 6.5 Comparación del Papel AD y Polímero con tiempo de vida útil 40.5 meses.	118
Figura 6.6 Contribución de ambos sustratos a cada categoría de impacto, incluyendo cajeros automáticos.....	121
Figura 6.7 Porcentaje de impacto por etapa de ciclo de vida, incluyendo ATM's.....	122
Figura 6.8 Contribuciones a la categoría de cambio climático, a) Valores totales por escenario, b) Valor porcentual por escenario.	124
Figura 6.9 Contribuciones a la categoría de agotamiento de combustibles fósiles, a) Valores totales por escenario, b) Valor porcentual por escenario.	125
Figura 6.10 Contribuciones a la categoría de agotamiento de recursos minerales, a) Valores totales por escenario, b) Valor porcentual por escenario.	126
Figura 6.11 Contribuciones a la categoría de ocupación de suelo agrícola, a) Valores totales por escenario, b) Valor porcentual por escenario.	127
Figura 6.12 Contribuciones a la categoría de ecotoxicidad terrestre, a) Valores totales por escenario, b) Valor porcentual por escenario.	128
Figura 6.13 Contribuciones a la categoría de agotamiento de agua, a) Valores totales por escenario, b) Valor porcentual por escenario.	129

Resumen

El Banco de México interesado en conocer el desempeño ambiental de sus billetes promovió el desarrollo de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con el objetivo de evaluar el impacto ambiental asociado a los billetes mexicanos a través de su ciclo de vida. Se busca comparar el desempeño ambiental de billetes impresos en dos tipos de sustrato: papel de alta durabilidad (papel AD) y polipropileno biaxialmente orientado (polímero).

El alcance del estudio abarca la extracción, manufactura y transporte de las materias primas, la impresión del billete, distribución, uso, retorno al Banco de México (Banxico), la destrucción de los billetes no aptos (procesamiento) y su disposición final. Para cada etapa del ciclo de vida se incluyeron las materias primas utilizadas, la electricidad, el agua y los combustibles empleados, así como los residuos generados con el correspondiente transporte a confinamiento.

El estudio se realizó con base en la Norma ISO 14040/44 (ISO, 2006). La unidad funcional seleccionada para la evaluación es: cantidad de billetes necesaria para mantener en circulación \$12,708 pesos en efectivo en billetes de \$200, durante un periodo de 5 años, en función de 2 tipos de sustrato: polímero y papel de alta durabilidad. El tiempo de vida útil para el billete de papel AD se definió como 31.5 meses y para el de polímero, 54 meses, de acuerdo a los datos proporcionados por el Banco de México.

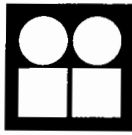
Las categorías de impacto evaluadas son: ocupación de suelo agrícola, cambio climático, agotamiento de combustibles fósiles, eutrofización de agua dulce, toxicidad humana, agotamiento de recursos minerales, reducción de ozono, formación de oxidantes fotoquímicos, acidificación terrestre, ecotoxicidad terrestre y agotamiento de agua, las cuales se modelan de acuerdo al método ReCiPe 1.08 con el apoyo del software Umberto NXT LCA versión 7.1 y la base de datos Ecoinvent v3.01. Se realizó un análisis de sensibilidad basado en dos aspectos: la consideración de diferentes tiempos de vida útil y la inclusión de los cajeros automáticos (ATM) durante la etapa de uso de los billetes.

Los resultados favorecen al billete impreso en sustrato de polímero en todas las categorías de impacto analizadas. Con relación al papel AD, las etapas de ciclo de vida que generan un mayor impacto en las categorías evaluadas son la extracción de materias primas para la fabricación de sustrato con una contribución que va desde 22% hasta 98%, así como la distribución del billete que contribuye con más del 30% en las categorías de agotamiento de recursos fósiles y formación de oxidantes fotoquímicos. En lo correspondiente al sustrato de polímero, la distribución del billete tiene un mayor impacto con contribuciones cercanas al 30% en seis categorías, seguido de la extracción de materias primas para la producción del sustrato con impactos entre el 30 y 60% en las categorías de eutrofización de agua dulce, ocupación de suelo agrícola y agotamiento de recursos fósiles. Con la inclusión de cajeros automáticos en la etapa de uso del billete, la electricidad requerida por estos dispositivos se convierte en el mayor contribuyente de impacto para ocho de las once categorías analizadas, con un 94% del impacto total.

A partir de los resultados se puede concluir que la etapa de extracción de materias primas, el tiempo de vida útil de los billetes y la electricidad en la etapa de uso, contribuyen en mayor medida al impacto ambiental generado por el ciclo de vida de los billetes mexicanos. Se recomienda fomentar el uso de materias primas que contribuyan a aumentar la vida útil de los billetes, así como el análisis de otros métodos de disposición final que apoyen a la ecoeficiencia del sistema.

Descargo de Responsabilidad

Algunos datos utilizados para la realización de esta tesis son considerados información reservada perteneciente al Banco de México, por lo que no se presentan en este documento. Para mayor información contactar mediante correo electrónico a la dirección lujan cristina@gmail.com ó LGuerecaH@iingen.unam.mx.



México DF, a lunes 8 de junio del 2015

Ing. Mirna Esperanza Cortés Campos
Directora de Administración de Emisión

Estimada Ing. Cortés, a través de este conducto y en cumplimiento a la cláusula Séptima: Propiedad intelectual, del convenio IISGCONV-014-2015, firmado entre Banco de México e Instituto de Ingeniería de la UNAM, relativo a la "Evaluación del Desempeño Ambiental de Billetes de Banco Mexicanos y Generación de Indicadores Ambientales (Segunda Etapa)"; me permito solicitar la autorización para publicar en una tesis de maestría parte de los datos y resultados obtenidos del proyecto.

La tesis a la que se refiere el párrafo anterior, ha sido uno de los productos que ha dado lugar este convenio y se titula: "Análisis de Ciclo de Vida de billetes mexicanos de polímero y papel de algodón de alta durabilidad"; así mismo, su autora Claudia Cristina Luján Ornelas, ha formado parte del equipo de trabajo del proyecto de investigación.

El formato en el que se presentará la información como parte de la tesis mencionada, ha sido acordado entre el Banco de México y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, asegurando en todo momento cumplir con los acuerdos de confidencialidad que se tienen comprometidos.

Los datos que se busca publicar son:

Inventario de Ciclo de Vida para el billete de papel AD

Parámetro	Cantidad /UF ¹	Unidades	Módulo
Insumos			
Textiles	110	g	Producción de fibra de algodón
Productos varios	2.6	g	Varios módulos
Barnices y recubrimientos	22.3	g	Varios módulos
Gases	0.214	g	Varios módulos
Polímeros	10.23	g	Varios módulos
Metales	1.16	g	Varios módulos
Papel	1.21	g	Producción de papel para impresión
Descargas al Agua			
DBO	1.9691	g	Demanda Biológica de Oxígeno DBO ₅
DQO	4.315	g	Demanda química de oxígeno
SS	0.885	g	Sólidos suspendidos
SST	0.4404	mg	Sólidos suspendidos
Emisiones al Aire			
CO	0.0061	g	Monóxido de Carbono
CO ₂	227.58	g	Dióxido de carbono
N ₂ O	0.1721	g	Óxido nitroso
NO _x	0.0239	g	Óxidos de nitrógeno
SO ₂	0.0021	g	Dióxido de azufre
Partículas Suspendidas totales	0.0084	g	Partículas, >10um
COVs	0.7149	g	compuestos orgánicos volátiles distintos del metano, de origen no especificado
Cr III	0.00000006	g	Cromo III



Parámetro	Cantidad /UF ¹	Unidades	Módulo
Cr VI	0.00005927	g	Cromo VI
Consumo energético			
Electricidad	0.2	kWh	Electricidad, alto voltaje, mix
Gas natural	9.59	kWh	Gas natural (Europa)
Consumo de agua			
Agua	0.006	m ³	Agua, origen natural
Transporte			
Camión	1.083	tkm	Transporte de carga, camión, 16-32 t
Tren	0.10	tkm	Transporte de carga, tren eléctrico (Europa)
Buque	0.93	tkm	Transporte de carga, buque transoceánico
Camioneta	0.0002	tkm	Transporte de carga, camión 3.5-7.5 t
Avión	0.71	tkm	Transporte de carga, aéreo
Transporte de residuos	0.02048	tkm	Transporte de carga, camión 3.5-7.5 t
Residuos			
Fibras	0.015	kg	Fibra de algodón
Residuos Peligrosos	0.008	kg	Disposición de residuos peligrosos, incineración
Trapos	0.0148	g	Disposición final de residuos textiles
Cartón	2.937	g	Disposición final de residuos de cartón
Madera	9.8865	g	Disposición final de residuos de madera
Metal ferroso	11.6245	g	Disposición final de residuos metálicos
Papel	1.1402	g	Disposición final de papel clasificado
Plástico	4.1424	g	Disposición final de mezcla de plásticos
Inorgánicos varios	0.6767	g	Disposición final de residuos sólidos municipales
Lodos provenientes de tratamiento de agua (aqua save)	12.391	g	Disposición final de lodos residuales provenientes de la producción de papel
aceites lubricantes usados	0.1592	g	Aceites gastados, origen industrial
disolventes orgánicos usados	0.1626	g	Disposición final de mezcla de solventes gastados
mercurio	0.000036	g	Disposición final de mercurio
pilas y baterías gastadas	0.0430	g	Disposición final de residuos de baterías
residuos de pinturas	0.4207	g	Producción final de residuos de pintura como residuos peligrosos, incineración
Billete destruido	116.84	g	Residuo de papel sin clasificar

¹ Las cantidades presentadas fueron obtenidas con base en 121 billetes correspondiente a la unidad funcional para el papel AD.

Inventario de Ciclo de Vida para el billete de polímero

Parámetro	Cantidad /UF ¹	Unidades	Módulo
Insumos			
Productos varios	1.52	g	Varios módulos
Barnices y recubrimientos	8.5	g	Varios módulos
Gases	0.125	g	Varios módulos
Polímeros	5.72	g	Varios módulos
Metales	0.6828	g	Varios módulos
Papel	0.71	g	Producción de papel para impresión
Descargas al Agua			
DBO	0.2177	mg	Demanda biológica de oxígeno DBO ₅
SST	0.2583	mg	Sólidos suspendidos
Grasas y aceites	0.2029	mg	Aceites gastados, origen industrial
Emisiones al Aire			
CO	0.1361	g	Monóxido de carbono

6.

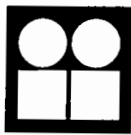


INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

Parámetro	Cantidad /UF ¹	Unidades	Módulo
COV's	1.5791	g	pcompuestos orgánicos volátiles distintos del metano, origen no especificado
NOx	0.0129	g	Óxidos de nitrógeno
PM ₁₀	0.4085	g	Partículas,>10um
CO ₂	17.3955	g	Dióxido de carbón
Partículas Suspendidas totales	0.0049	g	Partículas,>10um
Cr III	0.00000003	g	Cromo III
Cr VI	0.00003477	g	Cromo VI
Consumo energético			
Energía eléctrica	0.604	kWh	Electricidad alto voltaje, mix [AU]
Gas natural	0.0785	kWh	Gas natural
Agua			
Agua	0.0014	m ³	Agua, origen natural
Transporte			
Tren	-	tkm	Trasporte de carga, tren eléctrico (Europa)
Transporte aéreo	0.3798	tkm	Transporte de carga, aéreo
Buque	1.16	tkm	Transporte de carga, buque transoceánico
Camión	0.543	tkm	Transporte de carga, camión, 16-32 t
Transporte de residuos	0.0134	tkm	Transporte de carga, camión 3.5-7.5 t
Residuos			
basura	0.00021605	kg	Disposición de residuos sólidos urbanos
madera	0.00308132	kg	Disposición de residuos de madera
residuos del proceso	0.01471375	kg	Disposición de residuos de polietileno/polipropileno
Cartón	1.726	g	Disposición de residuo de cartón
Trapos	0.0087	g	Disposición final de residuos textiles
Madera	5.7996	g	Disposición final de residuos de madera
Metal ferroso	6.8191	g	Disposición final de residuos metálicos
Papel	0.6689	g	Disposición final de papel clasificado
Plástico	2.43	g	Disposición final de mezcla de plásticos
Inorgánicos varios	0.3970	g	Disposición final de residuos sólidos municipales
Lodos provenientes de tratamiento de agua (aqua save)	7.2688	g	Disposición final de lodos residuales provenientes de la producción de papel
Costras de tintas	0.2362	g	Disposición final de residuos de pinturas como residuos peligrosos, incineración
Billete destruido	60.35	g	Residuo de polipropileno
solventes usados	0.0967	kg	Disposición de mezcla de solventes gastados
aceites lubricantes usados	0.0934	g	Aceites gastados, origen industrial
mercurio	0.000021	g	Disposición final de mercurio
pilas y baterías gastadas	0.0252	g	Disposición final de residuos de baterías
residuos de pinturas	0.0116	g	Producción final de residuos de pintura como residuos peligrosos, incineración

Datos utilizados en la etapa de distribución de billetes

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Módulo ¹
	Papel AD	Polímero		
Distribución del billete				
Transporte aéreo	0.57	0.30	tkm	Transporte de carga, aéreo
Transporte terrestre	1.00	0.52	tkm	Transporte de carga, camión 16-32 t



INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

Datos utilizados en la etapa de procesamiento de billetes

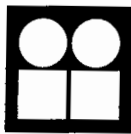
Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Módulo ¹
	Papel AD	Polímero		
Procesamiento del billete				
Electricidad	0.04291	0.0666	kWh	Electricidad alto voltaje, mix [MX]

Datos utilizados en la etapa de disposición final de residuos de producción

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Módulo ¹
	Papel AD	Polímero		
Residuos Inorgánicos				
Transporte de residuos	0.002058	0.001207	tkm	Transporte de carga, camión 3.5-7.5 t
Trapos	0.0148	0.0087	g	Disposición final de residuos textiles
Cartón	1.9293	1.1318	g	Disposición final de residuos de cartón
Madera	9.8865	5.7996	g	Disposición final de residuos de madera
Metal ferroso	11.6245	6.8191	g	Disposición final de residuos metálicos
Papel	1.1402	0.6689	g	Disposición final de papel clasificado
Plástico	0.8113	0.4759	g	Disposición final de mezcla de plásticos
Inorgánicos varios	0.6767	0.3970	g	Disposición final de residuos sólidos municipales
Residuos de Manejo Especial				
Transporte de residuos	0.000265	0.000155	tkm	Transporte de carga, camión 3.5-7.5 t
Lodos provenientes de tratamiento de agua	12.2661	7.1955	g	Disposición final de lodos residuales provenientes de la producción de papel
Plásticos como PET, polietileno de alta y baja densidad polipropileno (PP), policloruro de vinilo	0.3061	0.1795	g	Disposición final de mezcla de plásticos
Costras de tintas	0.4026	0.2362	g	Disposición final de residuos de pinturas como residuos peligrosos, incineración
Residuos Peligrosos				
Transporte de residuos	0.018156	0.010651	tkm	Transporte de carga, camión 3.5-7.5 t
Aceites lubricantes usados	0.1214	0.0712	g	Aceites gastados, origen industrial
Aceites gastados	0.0378	0.0222	g	Aceites gastados, origen industrial
Disolventes orgánicos usados	0.1626	0.0954	g	Disposición final de mezcla de solventes gastados
Mercurio	0.000036	0.000021	g	Disposición final de mercurio
Lodos provenientes de tratamiento de agua	0.1249	0.0733	g	Disposición final de lodos residuales provenientes de la producción de papel
Pilas y baterías gastadas	0.0430	0.0252	g	Disposición final de residuos de baterías
Residuos de pinturas	0.0181	0.0106	g	Producción final de residuos de pintura como residuos peligrosos, incineración

Datos utilizados en el escenario de disposición final de billete en relleno sanitario

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Módulo ¹
	Papel AD	Polímero		
Disposición final del billete				
Transporte	0.002622	0.001439	tkm	Transporte de carga, camión 3.5-7.5 t
Billete destruido	116.84	-	g	Residuo de papel sin clasificar
	-	60.35	g	Residuo de polipropileno

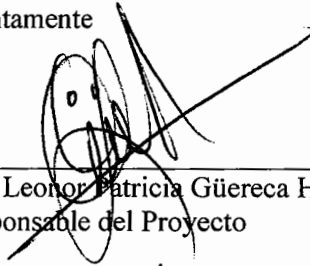


Tiempo de vida útil de los billetes papel AD y polímero establecidos para el análisis de sensibilidad

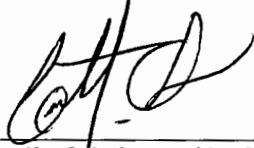
Sustrato	Escenario base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
	Tiempo de vida útil (meses)			
Papel AD	31.5	33.75	40.5	-----
Total de billetes requeridos para la UF	121	113	94	-----
Polímero	54.0	33.75	40.5	47.25
Total de billetes requeridos para la UF	71	113	94	81

Agradeciendo de antemano su atención

Atentamente



Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández
Responsable del Proyecto



I.Q. Claudia Cristina Luján Ornelas
Colaboradora del proyecto y autora de la tesis

Ref. M70-126/2015
17 de junio de 2015**Dra. Patricia Güereca Hernández**
Instituto de Ingeniería, UNAM


P r e s e n t e

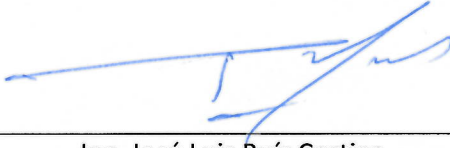
Nos referimos a su comunicación dirigida a la Dirección de Administración de Emisión del Banco de México, en la que solicitan el permiso para la publicación de resultados obtenidos a partir de los proyectos denominado *Evaluación del desempeño ambiental de billetes de banco mexicanos y generación de indicadores ambientales* y *Evaluación del desempeño ambiental de billetes de banco mexicanos y generación de indicadores ambientales (segunda etapa)* que el Instituto de Ingeniería de la UNAM llevó a cabo en colaboración con el Banco de México conforme a las especificaciones establecidas en los Convenios Específicos de Colaboración firmados por ambas instituciones el 3 de febrero de 2015 respectivamente. Al respecto, hacemos de su conocimiento que este Instituto Central otorga el permiso para incluir información correspondiente a los proyectos que nos ocupan en la tesis de grado de maestría que será presentada por la I. Q. Claudia Cristina Luján Ornelas bajo las siguientes consideraciones:

Los resultados, imágenes y gráficas relativos a los indicadores ambientales que sean incluidos no deberán ser modificados en relación con aquellos presentados en los informes que a la fecha hayan sido entregados al Banco de México.

La información correspondiente al Inventario de Ciclo de Vida, distribución y procesamiento de billetes, disposición final de residuos de producción y tiempo de vida útil considerados para la ejecución de los análisis se deberán apegar estrictamente al contenido indicado en su comunicación del lunes 8 de junio de 2015. Se anexa a la presente copia simple de dicha comunicación.

A t e n t a m e n t e,



M. en C. Sandra Zepeda Mollinedo
Subgerencia de Ingeniería Industrial

Ing. José Luis Ruíz Cortina
Gerencia de Desarrollo y Reingeniería de Procesos

Agradecimientos

A la Dra. Leonor Patricia Güereca por su dirección y apoyo en el desarrollo de esta tesis, pero sobre todo por su confianza y por creer en mí en cada momento.

Al Banco de México por proporcionar la información necesaria para la realización de este proyecto y por la cortesía brindada.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios.

Al ingeniero Salvador Quezada por su inolvidable ejemplo de vida, por la huella que con su amor dejó en mi corazón y por inspirarme a luchar para alcanzar mis sueños.

A mi Madre por su apoyo y amor incondicional, por darme una parte de sí misma con cada día de su vida.

A todos mis ángeles que me acompañan en cada momento, aquí en la tierra o desde el cielo. Gracias por la fuerza y la luz que le dan a mi camino, los llevo siempre en mi corazón.

A Dios por llenar mi vida de bendiciones y por permitirme llegar hasta aquí.

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

La producción de bienes y servicios siempre genera impactos ambientales, los cuales varían en cuanto a su categoría, vector impactado, orden de magnitud, marco de tiempo y escala geográfica. El reto de desarrollo sostenible es identificar dichos impactos y minimizarlos tanto como sea posible, al mismo tiempo que se favorece el desarrollo social y económico de las comunidades.

En virtud de lo anterior, el Banco de México, impulsado por su compromiso con el cumplimiento de acuerdos nacionales e internacionales en materia de productos sustentables y ambientalmente eficientes, está interesado en evaluar el desempeño ambiental de sus billetes a lo largo de su ciclo de vida.

Por tal razón, este estudio analizó el desempeño ambiental de los billetes mexicanos, desde la extracción de materias primas hasta el final de su vida útil, a través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que por su naturaleza holística permite determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a la producción de bienes y servicios.

El ACV de billetes mexicanos tiene como objetivo primordial, comparar el impacto ambiental de billetes en dos tipos de sustrato: fibra de algodón de alta durabilidad o papel AD, frente al de polipropileno biaxialmente orientado (BOPP), al cual se hará referencia en lo posterior como “polímero”.

Actualmente más de 30 bancos centrales alrededor del mundo han adoptado de manera parcial o total, el uso de billetes de polímero. Una de las principales motivaciones de esta modificación ha sido, el incremento en el tiempo de vida útil en comparación con el de algodón, además de la probable disminución de la amenaza respecto a la falsificación de billetes (Bouhdaoui, et al., 2013).

Diversos bancos centrales han desarrollado Análisis de Ciclo de Vida para evaluar el desempeño ambiental de sus billetes, tal es el caso del Banco de la Reserva Australiana (Reserve Bank of Australia, 1998), el Banco de Suiza (Swiss National Bank, 1999), el Banco Central Europeo (Banco Central Europeo, 2003), el Banco de la Reserva India (BRBNMPL, 2010), el Banco de Canadá (Bank of Canada, 2011) y el Banco de Inglaterra (Bank of England, 2013).

El ACV de billetes mexicanos permitirá generar información objetiva que apoye el proceso de toma de decisiones desde una perspectiva ambiental, coadyuvando así con el cumplimiento de los lineamientos y políticas de medio ambiente y sustentabilidad nacionales, como lo son el Plan Nacional de Desarrollo (PND, 2013), la Ley General de Cambio Climático (LGCC, 2012) y la Estrategia Nacional de Producción y Consumo Sustentable (ENPCS, 2012), entre otros.

El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología estandarizada a nivel internacional, que permite determinar todas las cargas ambientales asociadas a la producción de bienes y servicios, desde la obtención de las materias primas hasta su disposición final, analizando todos los vectores involucrados: agua, aire y suelo. Para esto, es necesario cuantificar las emisiones generadas por los procesos en cada una de las etapas, desde la extracción de las materias primas necesarias para la fabricación de un producto o para el desarrollo de un

servicio, la producción del mismo, su distribución, la etapa de vida útil y disposición final, incluyendo todos los flujos entrantes y salientes en cada uno de los procesos unitarios; lo que permite determinar los impactos que la producción de un bien o servicio ejerce sobre el medio ambiente. En este documento se presenta el Análisis de Ciclo de Vida de billetes mexicanos, estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1: Introducción. Se presenta una introducción al estudio, la justificación en el marco normativo de producción sustentable, así como los objetivos planteados.

Capítulo 2: Marco Teórico. Muestra los antecedentes de los billetes mexicanos a través de la historia, la creación del Banco Central Mexicano y el comienzo de la impresión de billetes en México, detallando el proceso de fabricación que se realiza actualmente en Banco de México, así como también se describen los tipos de sustratos más utilizados y su proceso de producción, la implementación de nuevos materiales como el polímero, sus ventajas e influencia a nivel mundial. En este capítulo se encuentra también una breve descripción del desempeño ambiental en México, el desempeño ambiental que han presentado los billetes en los últimos años y las aportaciones que este proyecto genera en materia de gestión ambiental.

Dentro del mismo capítulo se describe la metodología Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de acuerdo a la Norma ISO 14040/44 (ISO, 2006) y se analizan los estudios de ciclo de vida realizados por los Bancos Centrales de diversas partes del mundo, sus objetivos, desarrollo y resultados, lo cual es de suma importancia para ampliar el panorama del desempeño ambiental que los billetes han mostrado en otros países.

Capítulo 3: Metodología. Se puntualiza la metodología utilizada en el estudio, se establece el objetivo y alcance del ciclo de vida, la función y límites del sistema, unidad funcional, categorías de impacto, la descripción de las etapas de vida, los datos utilizados para la modelación de cada una de ellas, el procedimiento de recopilación de datos y las consideraciones que se tomaron en la realización del estudio.

Capítulo 4: Análisis del inventario. A lo largo de este capítulo se explica el procedimiento utilizado para realizar los cálculos pertinentes en cada una de las etapas del ciclo de vida, detallando cómo fueron manejados los datos proporcionados por el Banco de México y sus proveedores, así como también las consideraciones tomadas a lo largo del estudio.

Capítulo 5: Evaluación del impacto de ciclo de vida. En esta sección se presenta la evaluación de impacto de ciclo de vida y se discuten los resultados obtenidos respecto a cada una de las categorías de impacto seleccionadas. Se detalla la contribución de cada etapa de vida por categoría de impacto en valores totales y porcentuales. Al final del capítulo se muestran las gráficas de impactos globales caracterizados.

Capítulo 6: Análisis de Sensibilidad. El análisis de sensibilidad realizado para este estudio se basa en dos aspectos: la consideración de diferentes tiempos de vida útil y la inclusión de los cajeros automáticos durante la etapa de uso de los billetes.

El análisis de sensibilidad respecto al tiempo de vida útil consistió en variar el tiempo de vida de ambos sustratos, agregando dos escenarios para el papel AD y tres más para el sustrato de polímero, lo cual ha permitido analizar la relación entre el impacto ambiental generado por el ciclo de vida de los billetes respecto a los escenarios de tiempo de vida útil definidos.

En el análisis de sensibilidad incluyendo cajeros automáticos se incorpora la energía eléctrica consumida durante su funcionamiento para abastecer de billetes a todo el país durante la etapa de uso.

Se analizó la relación que existe entre el tiempo de vida útil del billete respecto a la magnitud del impacto generado, obteniéndose que conforme el tiempo de duración del billete en la etapa de uso aumenta, el impacto ejercido al ambiente disminuye considerablemente. Por otro lado, la inclusión del uso de cajeros automáticos para la distribución genera un fuerte impacto en todas las categorías analizadas debido a la electricidad que se requiere.

Capítulo 7: Conclusiones. Se presentan las conclusiones del Análisis de Ciclo de Vida de billetes Mexicanos, las cuales favorecen al billete impreso en sustrato de polímero en cada una de las categorías de impacto seleccionadas, lo que coincide con las referencias literarias analizadas en el capítulo 2.

1.1 Justificación

El billete es un medio ampliamente utilizado a nivel internacional, independientemente del lugar de origen o nivel socioeconómico, por lo que es de suma importancia que sea un “producto” durable, ambientalmente viable y que no represente un riesgo para la salud de quienes lo manipulan. En este aspecto recae la importancia de conocer el impacto ambiental asociado a los billetes mexicanos para lo cual es necesario analizar todas sus etapas de vida, conocer sus fortalezas y debilidades, evaluar los impactos que generan y la sostenibilidad del proceso.

ACV es una metodología estandarizada por ISO 14040 (ISO, ISO 14000 Environmental Management, 2006), aceptada y reconocida a nivel mundial, que motiva el desarrollo de una producción sustentable y ambientalmente responsable, así como también ofrece conocer y fortalecer el proceso de producción. Actualmente no se cuenta con estudios de ACV para los billetes mexicanos, sin embargo, existen varios estudios internacionales citados anteriormente, en donde se aplica ACV para evaluar el desempeño de sus billetes bajo diversos escenarios, con base en las categorías de impacto de mayor interés. Por tal motivo los resultados de esta investigación permitirán tener información precisa sobre el impacto ambiental que genera la producción de billetes en México, con base en dos tipos de sustrato, tomando en cuenta todas las etapas de su ciclo de vida y las condiciones de uso de este país.

Durante la última década, los efectos del cambio climático y la degradación ambiental se han intensificado ocasionando pérdidas humanas y económicas. Hoy existe un reconocimiento por parte de la sociedad acerca de la conservación del capital natural, así como de los bienes y servicios ambientales, ya que son aspectos clave para el desarrollo de los países y el bienestar de la población.

En este sentido, México está comprometido con la agenda internacional de medio ambiente y desarrollo sustentable, participando en más de 90 acuerdos y protocolos vigentes (PND, 2013). No obstante, el crecimiento económico del país sigue estrechamente vinculado a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), generación excesiva de residuos sólidos, emisión de contaminantes atmosféricos, descarga de aguas residuales no tratadas y pérdida de bosques y selvas. Es por esto que el gobierno mexicano ha publicado

diversos instrumentos regulatorios a fin de que el desarrollo del país se lleve a cabo de manera sostenible fomentando al mismo tiempo la protección de los recursos naturales.

Con base en lo anterior el proyecto de ACV de billetes mexicanos contribuye al cumplimiento y alcance de objetivos de lineamientos como son: El Plan Nacional de Desarrollo (PND) (PND, 2013), la Ley General del Cambio Climático (LGCC) (LGCC, 2012) y la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) (ENCC, 2013), Estrategia Nacional de Producción y Consumo Sustentable (ENPCS, 2012), entre otros.

Este proyecto busca aumentar la eficiencia ambiental del proceso de fabricación de billetes, haciendo uso adecuado de la energía necesaria para la producción, disminuyendo las emisiones de GEI a la atmósfera, las descargas a cuerpos de agua y llevando a cabo una adecuada disposición final de los residuos, basados en la identificación y mitigación de impactos, mediante una estrategia de toma de decisiones ambientalmente responsable.

A continuación se mencionan las contribuciones que el proyecto realiza a 3 de los principales lineamientos vigentes en México.

Respecto al Plan Nacional de Desarrollo (PND, 2013) que en su Objetivo 4.4, busca impulsar un crecimiento verde y promover una estrategia de desarrollo sustentable, así como fortalecer la política nacional de cambio climático, desarrollando una economía competitiva, sustentable y de bajo carbono, este proyecto contribuye con varias de sus líneas de acción:

Estrategia 4.4.1.

Líneas de acción

- *Promover el uso y consumo de productos amigables con el medio ambiente, así como tecnologías limpias, eficientes y de bajo carbono.*

Estrategia 4.4.3.

Líneas de acción

- *Adquirir un desarrollo bajo en carbono en los sectores productivos primarios e industriales.*
- *Promover el uso de sistemas y tecnologías avanzados, de alta eficiencia energética y de baja o nula generación de contaminantes o compuestos de efecto invernadero.*
- *Lograr un manejo integral de residuos sólidos, de manejo especial y peligrosos, que incluya el aprovechamiento de los materiales generados, así como minimizar los riesgos a la población y al medio ambiente.*

De esta manera, mediante la evaluación al proceso de fabricación de los billetes mexicanos y las correspondientes adecuaciones se apoya la transición a un sistema de producción bajo en carbono, contribuyendo así con las líneas de acción contempladas en el PND.

Mediante este proyecto se busca minimizar la producción de GEI en el proceso de fabricación de los billetes mexicanos, con apego a los lineamientos normativos de la Ley General de Cambio Climático (LGCC, 2012). Esta Ley tiene por objeto regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero para lograr la estabilización de sus concentraciones en la atmósfera, así como, regular las acciones para la

mitigación y adaptación al cambio climático y promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono; lo cual se alcanza con este proyecto mediante la evaluación de: 1) el desempeño ambiental de los billetes, 2) el uso de energía, 3) emisiones producidas, así como 4) descargas y residuos generados.

La LGCC puntualiza en su Título Cuarto la Política Nacional de Cambio Climático:

“Artículo 26. En la formulación de la política nacional de cambio climático se observarán los principios de:

...

II. Corresponsabilidad entre el Estado y la sociedad en general, para la realización de acciones encaminadas a la mitigación y adaptación de los efectos adversos del cambio climático;

V. Adopción de patrones de producción y consumo por parte de los sectores público, social y privado para transitar hacia una economía de bajas emisiones en carbono;

VIII. Responsabilidad ambiental, quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar al medio ambiente, estará obligado a prevenir, minimizar, mitigar, reparar, restaurar y, en última instancia, a la compensación de los daños que cause.”

De igual manera se favorece el cumplimiento de los objetivos en políticas públicas en materia de mitigación de la LGCC que a la letra cita en su Capítulo III Mitigación, Art 33, fracción IV y V:

“Artículo 33. Los objetivos de las políticas públicas para la mitigación son:

IV. Promover prácticas de eficiencia energética, el desarrollo y uso de fuentes renovables de energía así como la transferencia y desarrollo de tecnologías bajas en carbono...

V. Promover de manera prioritaria, tecnologías de mitigación cuyas emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero sean bajas en carbono durante todo su ciclo de vida;...”

De esta manera Banco de México asume esa corresponsabilidad entre el Estado y la sociedad llevando a cabo acciones para aumentar la eficiencia ambiental de sus procesos, mediante: la cuantificación y disminución de emisiones de GEI, tecnologías bajas en carbono, buen uso y cuidado de los recursos naturales y energéticos, logrando prevenir y minimizar efectos negativos al ambiente, cumpliendo con los objetivos político-ambientales que la Ley establece.

El ACV de billetes mexicanos contribuye también con los objetivos de la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC, 2013) en cada una de sus puntos estructurales: Pilares de política nacional (P), adaptación a los efectos del cambio climático (A) y en el desarrollo bajo de emisiones (M). Pues se pretende modificar los hábitos de producción en busca de un mejor uso de la energía y disminuir la producción de GEI, realizando también una cooperación con la sociedad mexicana y su gobierno, lo que contribuye a la mejora inmediata de la calidad del aire, generando efectos positivos en la salud pública y ayudando a la conservación de los ecosistemas que componen el territorio nacional.

Este estudio fortalece el objetivo de la ENCC al reducir las emisiones de GEI, adoptando prácticas productivas más eficientes en la elaboración de billetes y colaborando a la mitigación de los efectos del cambio climático como se ostenta en su pilar M5, que tiene como objetivo citado a la letra:

“M5 Reducir emisiones de Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCVC) y proporcionar cobeneficios de salud y bienestar.”

Contribuyendo así con las siguientes líneas de acción:

“P1.8 Implementar acciones de mitigación y adaptación intersectoriales mediante la coordinación y concurrencia entre dependencias y de éstas con las entidades públicas y privadas.

P2.7 Promover la producción sustentable en el país.

P2.14 Incorporar criterios de cambio climático en los lineamientos para favorecer proyectos que involucren energías renovables y limpias y promuevan la transición a tecnologías menos intensivas en carbono.

P3.3 Generar mecanismos para la toma de decisiones ambientalmente responsables.

P3.7 Asegurar la vinculación academia-industria para el desarrollo, apropiación y transferencia de tecnologías de reducción y control de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero.

A2.9 Implementar técnicas y tecnologías en todos los sectores productivos que fomenten el uso eficiente de los recursos y administren los riesgos asociados al cambio climático.

A2.12 Incorporar criterios de cambio climático en la planeación y construcción de nueva infraestructura estratégica y productiva para el fortalecimiento de capacidades para la adaptación.

M2.5 Implementar prácticas sustentables en los sectores público y privado, al utilizar altos estándares de eficiencia y criterios de compras verdes.”

Con la realización de este proyecto se fortalece el cumplimiento de los propósitos planteados en la Estrategia Nacional de Producción y Consumo Sustentable (ENPCS, 2012), debido a que el Banco de México busca adoptar estándares internacionales en sus procesos productivos, mediante el enfoque de ciclo de vida de sus productos, procesos de fabricación y adquisición de materiales, promoviendo la oferta de bienes y productos sustentables.

En función de lo anterior se llevó a cabo un Análisis de Ciclo de Vida que evalúa el impacto ambiental generado por dos tipos de billetes utilizados actualmente en México, los cuales se evaluaron conforme a las categorías de impacto seleccionadas, permitiendo conocer más a profundidad el desempeño del billete y de su proceso de producción, facilitando la evaluación del mismo y la toma de decisiones futuras.

1.2 Pregunta de investigación

¿Qué tipo de billete genera menos impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida, considerando las condiciones de México?

1.3 Hipótesis

El billete fabricado en sustrato de polímero genera menos impacto ambiental.

1.4 Objetivo

Tomando como marco de referencia lo anterior, este proyecto tiene como objetivo:

Realizar una evaluación comparativa de las cargas ambientales asociadas al ciclo de vida de los billetes mexicanos, mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida tomando como referencia las especificaciones establecidas en las Normas ISO 14040/44, con la finalidad de determinar el impacto ambiental ejercido en cada etapa de vida del billete.

1.4.1 Objetivo específico

Evaluar el desempeño ambiental del ciclo de vida del billete de \$200 pesos en función de dos tipos de sustrato: polímero y algodón de alta duración, de acuerdo a las condiciones de producción y uso en México.

Capítulo 2

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se muestran los antecedentes de los billetes a través de la historia, el proceso de fabricación y los tipos de sustratos más utilizados. Se describe la metodología Análisis de Ciclo de Vida de acuerdo a la Norma ISO 14040/44 (ISO, 2006) y se analizan los estudios de ciclo de vida realizados por los Bancos Centrales a nivel internacional, con la finalidad de proporcionar un contexto acerca de los billetes, su desempeño ambiental en otros países y de la metodología de ACV.

2.1 Historia del billete

La historia del billete se remonta a la época de la práctica del trueque en los siglos V-III a.C., el cual consistía en el intercambio de mercancías en función de un interés recíproco en los productos ofrecidos, ya que no era posible distinguir o asignar un precio específico a los bienes. Un siglo después griegos y chinos de forma independiente y prácticamente simultánea se dieron cuenta de que el beneficio que obtenían por el intercambio de productos, podía adoptar la forma de unidades estandarizadas de metal con una indicación de autoridad para avalar la calidad de las piezas, de esta manera aparecen las monedas como medio de pago. Tiempo después surge el billete, el cual se presenta como una solución a los problemas de acumulación que generaba el uso de metales, debido a su mayor comodidad y ligereza, desplazando así a los metales preciosos con sistemas fiduciarios en los que la emisión del dinero ya no dependía del valor del material del que este se fabricaba, sino de una decisión política de fabricación y circulación del mismo desde ese momento, los billetes se convirtieron en los valores más elevados del sistema monetario.



Figura 2.1 Billete Ming (22x34 cm), 1375.
Fuente: (Museu de Prehistòria de València, 2011)

La aparición del papel moneda, no tiene una ubicación histórica específica, sin embargo, se sabe que su uso oficial se instauró en China en el año 812, aunque ya circulaba en este país desde el siglo VII, después de cinco siglos en los que este imperio desarrolló la fabricación de papel a partir de los residuos de la seda, la paja de arroz y del algodón para uso de sus antiguos emperadores. En la actualidad no queda ningún ejemplar de aquellos primeros billetes, los más antiguos son los que se conservan del siglo XIV. El ejemplar catalogado como el billete más antiguo se fabricó en papel morera en la dinastía China, aproximadamente hacia los años 1375, el cual se muestra en la Figura 2.1.

Tiempo después, en el año 1661, aparecieron los primeros billetes europeos fabricados en Suecia, utilizados como recibos o resguardo a quien depositaba oro o plata en el Banco de Estocolmo. En 1780, el papel

moneda llegó a España ganando gran popularidad por ser mucho más cómodo de llevar y transportar, pues ya no era necesario contar con una bolsa de monedas, la cual resultaba muy pesada y llamativa.

2.2 Los billetes mexicanos a través de la historia

Durante la conquista, los españoles que llegaron al Nuevo Mundo comenzaron a utilizar los medios de cambio implementados por los indígenas, tales como el cacao, cuentas de jade y mantas de algodón entre otros; mientras tanto se dedicaban a reunir grandes cantidades de oro y plata, con los que se realizaron los primeros intentos de imitar la moneda metálica europea. Se fundieron discos de una aleación de oro y cobre, llamados *pesos de tepuzque*, cuyo peso correspondía al de un castellano que era la moneda española de aquella época; años después, alrededor de 1536 se originó la unidad monetaria en México y de otros países latinoamericanos, el Peso.

Tiempo después, en la época del virreinato de la Nueva España con duración de alrededor de 300 años, la minería se situó como actividad económica principal, dando la oportunidad de acumular una gran cantidad de metales finos. Fue así como hasta principios del siglo XX el dinero de la época se componía exclusivamente de monedas de oro, plata y algunas cuantas de cobre, debido en gran parte a que el valor nominal de las monedas equivalía al valor al que podía venderse el metal del cual estaban fabricadas, lo cual permitía que fueran aceptadas como medio de pago sin ningún inconveniente ni disgusto por la población.

Por otro lado, el uso del papel moneda en México se puede situar a principios del siglo XIX, sin embargo, su aceptación no fue inmediata, por lo que se necesitaron muchos años y varios intentos para que los billetes fueran utilizados en México.

En 1810, durante la Guerra de Independencia se inició una lucha armada con la finalidad de acabar con el dominio español; en virtud de lo ocurrido en esta época, muchos españoles regresaron a su país y los que se quedaron en la Nueva España escondieron sus fortunas. Las minas que continuaban abiertas fueron saqueadas. Además, se redujo el traslado de los reales mineros a la Ciudad de México por la inseguridad de los caminos. Todo esto provocó una profunda crisis económica y un desabasto de monedas metálicas. Fue así como se presentó una fuerte necesidad de contar con un medio de pago, surgiendo como respuesta las monedas de cobre y plata. A su vez, aparecieron también piezas de cartón escritas a mano con tinta negra, con denominación de medio



Figura 2.2 Piezas de cartón emitidas en 1813.
Fuente: (Banco de México, 2013)

real que era el nombre asignado a la moneda de aquella época, con fecha de julio 1813, reconocidas hoy en día como el antecedente más antiguo del billete mexicano (Figura 2.2).

Al finalizar la Independencia, México se encontraba con una economía en pésimas condiciones y se aplicaron diversas estrategias para resolver la situación. En diciembre de 1822 se emitieron los primeros billetes oficiales mexicanos, impresos por una sola cara, en papel blanco de forma casi cuadrada, llevando

en ellos la leyenda *Imperio Mexicano*, en denominaciones de 1, 2 y 10 pesos (Figura 2.3). Sin embargo, debido a la desconfianza de la población los billetes fueron rechazados, pues las personas estaban acostumbradas a utilizar monedas de plata.



Figura 2.3 Primera emisión oficial de billetes mexicanos.
Fuente: (Banco de México, 2013)

Con el paso del tiempo se comenzó a acuñar la moneda en metales industriales, reduciendo el valor intrínseco de las piezas; fue así como el billete de banco se convirtió en el medio de pago más utilizado hasta hoy en día.

Al inicio, los billetes mexicanos fueron emitidos por bancos privados y su aceptación era voluntaria, dependía completamente de la decisión personal de la población, poco después fueron emitidos también por el gobierno, pasando a ser de aceptación obligatoria.

En 1823 con la constitución de México como República Federal, las condiciones económicas del país eran difíciles, por lo que para frenar el rechazo de la población hacia los billetes, se decidió imprimir nuevos billetes al reverso de bulas papales canceladas; es decir, documentos religiosos que llevaban el sello Papal, esperando obtener así la aceptación del pueblo mexicano por su religiosidad y al mismo tiempo evitar la falsificación. A pesar de esto, el billete no logró ganar la confianza de la población y tuvo que ser retirado de circulación.

Después de varias décadas, en 1864 se retomó el proyecto bajo la emisión de un banco privado, en denominaciones de 1,5, 10, 20, 50, 100, 500 y 1000 pesos, siendo los billetes de aceptación voluntaria, en esta ocasión la aceptación fue exitosa (Figura 2.4).



Figura 2.4 Billetes mexicanos emitidos por bancos privados.
Fuente: (Banco de México, 2013)

De esta manera, bajo la emisión de bancos privados se pusieron en circulación varias series de billetes, sin embargo, durante la Revolución Mexicana debido a una fuerte alteración del orden económico y social se retiraron de circulación enormes cantidades de monedas y resurgió el rechazo al billete. Poco después, origen del desenvolvimiento de este conflicto armado se comenzó a emitir grandes cantidades de billetes, por lo cual el papel moneda se depreció aceleradamente y el sistema bancario mexicano que fue construido con grandes dificultades se derrumbó rápidamente.

En 1916 se emitió una nueva serie de billetes, mucho más sofisticados, con el objetivo de eliminar las falsificaciones, los cuales eran impresos por American Bank Note Company de Nueva York (Figura 2.5). A estos billetes se les conoció como *infalsificables*, sin embargo, para fines de ese mismo año debido a una fuerte devaluación, estos billetes ya no era utilizables (Banco de México, 2013).



Figura 2.5 Serie de billetes mexicanos impresos por American Bank Note Company
Fuente: (Banco de México, 2013)

2.2.1 Creación del Banco Central Mexicano

El 1 de septiembre de 1925, el Banco de México inicio sus funciones, con la facultad exclusiva de crear una moneda mediante acuñación de piezas metálicas y emisión de billetes, así como regular la circulación monetaria, tasas de interés y el tipo de cambio.

El Banco de México logró prestigio muy rápidamente, sin embargo, la circulación de los billetes era débil, debido a que uno de los principales problemas que enfrentó fue restaurar la confianza en el público, aun y cuando las primeras piezas fueron de aceptación voluntaria, buscando restaurar paulatinamente la confianza en el papel moneda como medio de pago.

Las primeras tres series de billetes mexicanos fueron impresas por la American Bank Note Company de Nueva York (ABNC), en los años 1925-1934, 1935-1942 y 1936-1978, respectivamente y estaban compuestas por billetes de 5, 10, 20, 50, 100, 500 y 10000 pesos. Dentro de la tercer serie, se incluyó el billete de 1 peso, único de esta nominación emitido por el Banco de México en toda su historia (Figura 2.6).



Figura 2.6 Primeros billetes del Banco de México, impresos por American Bank Note Company
 Fuente (Banco de México, 2013)

Hoy en día, el Banco de México, en cumplimiento con su mandato constitucional, se encarga de proporcionar billetes y monedas en cantidad suficiente a todo el país, en las denominaciones requeridas, con la seguridad y calidad adecuada (Banco de México, 2013).

2.2.2 Billetes impresos por la fábrica del Banco de México

En el año de 1969 con el inicio de actividades de la Fábrica de Billetes del Banco de México, se publicó la cuarta serie de billetes mexicanos que duraría en circulación hasta 1991, conocida como Tipo A, integrada por billetes de 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 2000, 5000, 10,000, 20,000, 50,000 y 100,000 pesos, los cuales se muestran en la Figura 2.7.



Figura 2.7 Serie de billetes tipo A
Fuente: (Banco de México, 2013)

Tiempo después, en los años setenta y ochenta, México atravesó por fuertes inflaciones, que influyeron en la capacidad de compra de la población. Ante esta circunstancia y con el fin de simplificar el manejo de las cantidades en moneda nacional, el 18 de junio de 1992 se estableció que a partir de 1993 se emplearía una nueva unidad del sistema monetario en los Estados Unidos Mexicanos, equivalente a 1000 pesos de la unidad anterior. La nueva unidad llevaba el nombre de “Nuevos Pesos” (Figura 2.8). En virtud de lo anterior en 1992 se emitió una nueva serie de billetes en las denominaciones 10, 20, 50 y 100 llamada Tipo B, caracterizada por conservar el diseño de los billetes anteriores (Banco de México, 2013).



Figura 2.8 Serie de billetes tipo B
Fuente: (Banco de México, 2013)

En octubre de 1994, una vez que el público se adaptó al nuevo régimen monetario, se emitió otra serie de billetes en “Nuevos Pesos”, con nuevos diseños, conocida como Tipo C; la cual contaba con denominaciones de 10, 20, 50, 100, 200 y 500 nuevos pesos (Figura 2.9). Su característica principal es que fueron fabricados en dos tamaños, uno reducido para las denominaciones bajas y otro más grande para las denominaciones altas.



Figura 2.9 Serie de billetes tipo C
Fuente: (Banco de México, 2013)

Finalmente, para concluir el proceso de adaptación monetaria, se emitió otra serie eliminando el adjetivo de “Nuevos”, volviendo al término de “Pesos” (1994-2001). Esta serie se mantuvo en circulación hasta el año 2001 y se le denominó serie Tipo D (Figura 2.10), conservando las mismas denominaciones y diseño que la serie anterior.



Figura 2.10 Serie de billetes tipo D
Fuente: (Banco de México, 2013)

En el año 2001 se emite la serie conocida como Tipo D1 (Figura 2.11), la cual conserva los mismos diseños pero incorpora nuevos elementos de seguridad. Como parte de esta serie a partir del 2002 se pusieron en circulación billetes de 20 pesos impresos en polímero, con una ventana transparente como característica de seguridad y debido a que es un material más durable se incorporó en los billetes de baja denominación pues son los que se deterioran con mayor rapidez. La última modificación que se realizó a esta serie fue la incorporación del billete de 1000 pesos a partir del 2004, impreso en papel de algodón (Banco de México, 2013).



Figura 2.11 Serie de billetes tipo D1
Fuente: (Banco de México, 2013)

2.2.3 Serie actual de billetes del Banco de México

El diseño de los billetes mexicanos es un proceso minucioso que abarca una estructurada planeación, investigación y desarrollo realizado por personal altamente especializado. Basándose en una investigación documental e iconográfica que incluye obras de arte, vida y obra de personajes notables, sitios geográficos, entre otros. La información es analizada para elegir los elementos más apropiados para el diseño.

Hoy en día los billetes mexicanos tienen por tema central algún personaje notable de este país, complementado con imágenes de objetos, lugares o símbolos referentes a su vida y obra, lo cual representa una identidad cultural nacional que busca resaltar la historia y tradiciones de su pueblo.

La serie de billetes que actualmente circula en México es la denominada Tipo F (Figura 2.12), la cual posee un mayor número de elementos de seguridad, así como diferentes colores y tamaños para cada denominación, lo cual facilita su diferenciación.

Todos los billetes miden 66 mm de ancho y varían en el largo, entre cada una de las denominaciones se mantiene una diferencia de 7mm. Los billetes de 20 y 50 pesos se imprimen en polímero mientras que el resto se imprime en papel de algodón. Dentro de esta familia de billetes también se encuentran billetes de emisión única. Se trata de los billetes conmemorativos del centenario del inicio de la Revolución Mexicana (impreso en polímero) y del bicentenario del inicio de la Independencia de México (impreso en papel de algodón), en denominaciones de 100 y 200 pesos, respectivamente (Banco de México, 2013).

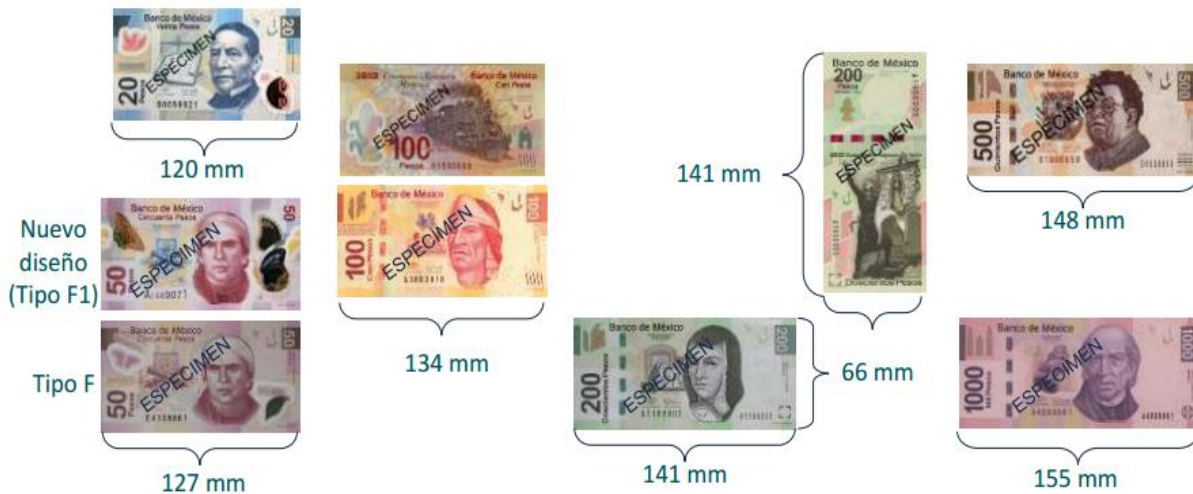


Figura 2.12 Serie de billetes tipo F.
Fuente: (Banco de México, 2013)

2.3 Desempeño ambiental de billetes

Los billetes como cualquier otro tipo de producto, poseen un impacto ambiental asociado a su fabricación, debido a que requiere el uso de materias primas, transportación y disposición final entre otros aspectos que conforman su ciclo de vida. Uno de los factores determinantes de la magnitud del impacto ambiental generado por este producto es la vida útil que proporcionan los materiales utilizados para su fabricación, a la denominación y el manejo proporcionado durante su circulación, estos factores derivarán en un desgaste

natural del billete. Por esta razón los billetes en circulación deben ser retirados después de determinado tiempo y ser reemplazados por nuevos ejemplares.

En virtud de lo anterior, las investigaciones realizadas en las últimas décadas se han dedicado a desarrollar nuevos materiales para incrementar la vida útil de los billetes, disminuyendo así la tasa de reemplazo y por lo tanto también su producción, transporte y disposición final. Con esta alternativa se disminuye también los costos de producción, el uso de materias primas y la generación de residuos. De esta manera se obtienen beneficios no solo económicos sino también ambientales reduciendo los impactos asociados al proceso de producción. En consecuencia, se han adoptado estrategias tendientes a incrementar la resistencia al desgaste que presentan los billetes en la etapa de circulación y aumentar su durabilidad (IPCA, 2012).

2.4 El billete en la actualidad

Con el paso del tiempo el papel moneda ha sufrido innumerables cambios, tanto en su diseño, como de material y denominación, entre otros, pero siempre se ha posicionado como un símbolo de soberanía y nacionalidad en cada uno de los países del mundo. Es por eso que es de suma importancia conocer a profundidad las características de los billetes que se manejan en México.

2.4.1 Tipos de sustratos para la fabricación de billetes

Por más de 100 años, la única materia prima utilizada para la fabricación de billetes de banco fueron las fibras naturales, sobre todo el algodón, siendo este material la base de las principales monedas del mundo. Sin embargo, desde los años sesentas, se ha buscado desarrollar sustratos más duraderos como alternativa al papel de algodón, lo cual ha beneficiado a los bancos centrales del mundo mediante la posibilidad de una solución diferente, así como mejoras significativas en la calidad de sustratos y elementos de seguridad.

Las características básicas e imprescindibles en un billete consisten en durabilidad, seguridad y funcionalidad, por lo que a mediados de la década de los noventas se comenzó a desarrollar un tipo de billete a base de fibra de algodón pero mucho más resistente y durable denominado “durable paper”, manteniendo los elementos de seguridad utilizados en el papel de algodón convencional. Es así como a finales de esa década comenzaron a circular los primeros billetes impresos sobre este tipo de sustrato. Para aumentar la resistencia de los billetes debido al desgaste, se aplicó una capa protectora que a la vez disminuía considerablemente la tendencia de acumulación de suciedad. De esta manera se elevó la durabilidad de los billetes de fibra de algodón, sin embargo, años más tarde se comenzaron a estudiar otras opciones de sustrato.

Actualmente se utiliza también el sustrato de polímero para billetes bancarios que consiste en un material plástico revestido, delgado, resistente y de manufactura única, que ofrece una duración de circulación significativamente más larga que la de los billetes tradicionales a base de papel de algodón. Esta nueva alternativa de sustrato desempeña un papel importante en el futuro de los billetes, debido a que entregan mayores niveles de seguridad a través de los innovadores elementos de seguridad, mayor durabilidad y limpieza, pues guarda menos suciedad ya que no es un material poroso, lo que prolonga su tiempo de vida útil (IPCA, 2012).

2.4.2 Billeto de algodón

2.4.2.1 Cosecha y producción de algodón

La industria algodonera es uno de los principales sectores de la producción textil, el algodón se encuentra a la cabeza de los cultivos de fibra con un 40% del mercado mundial, cultivándose en más de 100 países. La producción mundial es de 25.5 millones de toneladas de algodón y se cultiva en 34.8 millones de hectáreas. Estados Unidos, China e India son los principales productores de algodón en el mundo con un 60% de la producción mundial, seguido de Pakistán, Argentina, Brasil, Australia y Egipto.

El algodón se cultiva en diversos climas, como son el tropical, subtropical y templado, debido a que es muy susceptible a temperaturas extremas. El periodo de crecimiento total es de 150 a 180 días con una temperatura óptima de 18 a 30°C y suelos fértiles, arcillosos y profundos de pH neutro.

El cultivo de algodón es el tercer cultivo que más agua consume, después del arroz y el trigo; según las técnicas de riego empleadas, se necesitan cerca de 5,400 y 19,000 litros de agua para producir un kilogramo de algodón. Este cultivo requiere de 120 días de riego para garantizar su crecimiento, seguido de un periodo seco en el cual es necesaria una gran cantidad de luz solar para que la cápsula se abra y la fibra no se pudra (Traxco, 2012).

2.4.2.2 Producción de sustrato de algodón

Dentro de la producción del papel de algodón se pueden definir dos procesos principales, el primero es la fabricación de la pasta y comienza una vez que el algodón es cosechado y se encuentra libre de impurezas, se suavizan las fibras, se reduce su humedad y es llevado a la máquina peinadora, donde el algodón es convertido en una pasta uniforme y fina. El segundo proceso es la fabricación del papel, donde la pasta se refina para desfibrar y cortar las fibras a fin de adaptarlas para el proceso, con este procedimiento se disminuye la porosidad, la opacidad, el desagote de la pasta, que consiste en extraer el líquido contenido y el índice de volumen mediante procedimientos químico-mecánicos; posteriormente se mezclan aditivos que proporcionan al papel características adecuadas para su uso, mejoran propiedades como la opacidad y la blancura, además de aumentar la calidad de la impresión. La siguiente etapa consiste en realizar el encolado, adicionando productos hidrófobos como pegamentos, resinas y productos fijantes a la pasta para evitar que en el momento de la impresión la tinta se corra o disperse. Posteriormente mediante un depurador se eliminan las partículas no deseables durante el proceso de fabricación.

Una vez que se han dado las propiedades necesarias a la pasta y se ha preparado la mezcla de materias primas se gradúa el espesor del papel mediante una serie de prensas y rodillos que componen la mesa de fabricación, en donde se forma la hoja y se reduce su contenido de humedad. Una vez que se forma la hoja de papel, se aplica un proceso de prensado y secado.

Cuando se termina la formación del papel se realiza el proceso de estucado, el cual consiste en aplicar una especie de pintura que proporciona a la hoja una superficie lisa y el brillo necesario para que la tinta se adapte al papel. Posteriormente se realiza el proceso de calandrado en el cual se mejora el brillo del papel y las propiedades de impresión. La hoja de papel se embobina y finalmente se le dan los acabados deseados,

se añaden detalles tales como hilos de seguridad, se cortan las hojas y se inspeccionan para efectos de calidad (Torras Papel S.A, 2008).

La producción de papel de algodón requiere un uso intensivo de fibras de algodón, productos químicos, agua y genera una alta demanda de energía eléctrica. El uso de agua es un factor determinante en este proceso ya que se necesita para limpieza, refrigeración, generación de vapor y como agente vinculante para formar puentes de hidrógeno entre las fibras. Los procesos de producción de pasta y papel pueden requerir entre 10 y 100 litros de agua por kilogramo de papel producido. Por otro lado, la energía utilizada para la producción de una tonelada de papel se encuentra en un rango de 3-5 MWh (IUSES, 2010)

2.4.3 Billeto de polímero

A raíz del elevado consumo y gran demanda de recursos naturales, la sociedad ha comenzado una continua búsqueda por desarrollar materiales más eficientes y ambientalmente sustentables, que permitan preservar el medio ambiente para las generaciones futuras. Como parte de esta búsqueda, durante los últimos años se han generado nuevos materiales que proporcionan una mayor durabilidad, seguridad y menor impacto ambiental. En esta ocasión fue Australia quien se colocó a la cabeza del desarrollo de una nueva propuesta de sustrato, el polipropileno biaxialmente orientado (BOPP).

El billete de polímero tiene sus inicios en 1988 cuando el Banco de la Reserva de Australia en conjunto con CSIRO (The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) y la Universidad de Melbourne iniciaron una investigación para obtener una solución científica que eliminara la fuerte problemática de falsificación que se presentaba en aquella época. La solución de CSIRO era desarrollar un material más durable, más ecológico y con menos probabilidades de llevar suciedad que colaborara con la transmisión de enfermedades; también visualizaban la posibilidad de ver a través del billete, mediante un panel y un holograma; fue así como aparecieron en primicia mundial, los dispositivos ópticamente variables (OVD) creados a partir de redes de difracción en plástico y que se definen como cualquier dispositivo que cambia su aspecto cuando se modifica algún factor externo del billete, tales como el ángulo de visión, la temperatura o tipo la luz del ambiente, los cuales se insertan en el billete sin necesidad de perforaciones.

Dicho estudio dio como resultado en 1988, la emisión y puesta en circulación de un billete de \$10 dólares australiano, el cual ilustraba en su anverso el buque “Supply” y un conjunto de australianos contra un fondo de Sidney Cove basado en un grabado de un boceto de John Hunter (Figura 2.13). En el reverso del billete aparece una ilustración de la cultura aborigen de Australia, antiguas pinturas rupestres y un retrato de un joven aborigen adornado con pinturas corporales (Figura 2.14).

El primer billete de denominación \$5 dólar AUS, se publicó en julio de 1992 y poco a poco se continuó con el cambio de todas las denominaciones. Para 1998 todos los billetes australianos se emitieron en polímero y en el 2009, se fabricaban distintos diseños exclusivos que se exportaban a 25 países (IPCA, 2012).



Figura 2.13 Anverso del primer billete de polímero en el mundo
Fuente: (Polímero clásico, 2012)



Figura 2.14 Reverso de primer billete de polímero en el mundo
Fuente: (Polímero clásico, 2012)

Cabe destacar que en 1983, Costa Rica y Haití emitieron una serie de billetes fabricados en un material denominado Tyvek. Por otro lado, la Isla de Man emitió otros ejemplares sobre un material similar al anterior, llamado Badvek, los cuales fueron impresos y desarrollados por empresas de origen estadounidense. Sin embargo, estos billetes presentaron muchos problemas al momento de colocarse en circulación, como lo fue el desvanecimiento de la tinta, por lo cual fueron suspendidos y retirados, interrumpiéndose el proyecto.

Los billetes de polímero, tal y como se conocen hoy en día, se fabrican de un polímero termoplástico, llamado Polipropileno Biaxialmente Orientado (BOPP), el cual es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones y que mejora significativamente la durabilidad, calidad y rentabilidad del billete; también es capaz de incorporar una gran cantidad de elementos de seguridad no disponibles en billetes de fibra de algodón, lo que hace más difícil su falsificación.

El brazo comercial del Banco de la Reserva de Australia, "Securrency", junto con un fabricante de películas de polipropileno, comercializan el BOPP bajo el nombre de Guardian Polymer® para su uso en billetes. La Note Printing Australia, otra filial del banco, imprime los billetes conmemorativos y de circulación para países en todo el mundo; hasta la fecha imprime para 25 países, incluyendo a México. La primera patente derivada de la evolución de los billetes de polímero fue presentada en 1973 (Reserve Bank of Australia, 2013).

2.4.3.1 Proceso de Adopción del Billeto de Polímero

A partir de los años 90's varios países alrededor del mundo han adoptado el uso de billetes de polímero en todas sus denominaciones: Australia, Bermuda, Brunéi, Nueva Zelanda, Papúa Nueva Guinea, Rumania, Vietnam y Canadá. En otros más circulan solo algunas de sus denominaciones en sustrato de polímero: Bangladesh, Brasil, Chile, República Dominicana, Hong Kong, Indonesia, Israel, Malasia, México, Nepal, Nigeria, Islas Salomón, Sri Lanka, Tailandia, Samoa, Singapur y Zambia. China, Taiwán, Kuwait, Irlanda del Norte y Singapur.

En los últimos cinco años, ocho bancos centrales en América Latina han emitido 18 denominaciones impresas en sustrato Guardián®; En la actualidad, más de veinte bancos centrales utilizan el sustrato de polímero en la impresión de sus billetes en circulación y otros diez lo hacen por motivos conmemorativos (Tabla 2.1); sin embargo, tomando en cuenta aquellos países que han utilizado algún material híbrido u otro sustrato de alta durabilidad, llegan a cerca de cincuenta los bancos centrales que implementan un nuevo tipo de material, buscando aumentar la durabilidad y funcionalidad de su producto. Por lo general se puede observar que los bancos centrales empezaron emitiendo billetes de carácter conmemorativo para luego continuar con los de menor denominación debido a su mayor frecuencia de uso. La evidencia internacional muestra ventajas respecto a la durabilidad del billete de polímero (Giusti & Vásquez, 2013).

Tabla 2.1 Países que utilizan polímero en sus billetes en circulación

Continentes	País	Moneda	Denominación		Año de emisión
			En circulación	Conmemorativo	
Oceanía	Australia	Dólar AUS	5,10,20,50,100	10	1988
	Islas Salomón	Dólar	2		n.d.
	Nueva Zelanda Papua	Dólar NZ	5,10,20,50,100	10	1999
	Nueva Güinea	Kina	2,5,10,20,50,100		1991
	Vanuatú	Vatu		10 000	n.d.
Asia	Brunéi	Dólar BRU	1,5,10,50,100,500,1000, 10 000	20	2007
	China	Yuan		100	2001
	Hong Kong	Dólar HK		10	2007
	Indonesia	Rupia IND		50000	1993
	Israel	Sheqel	20		2008
	Kuwait	Dinar		1	1993
	Malasia	Ringit	1,5	50	1998
	Nepal	Rupia	10		n.d.
	Singapur	Dólar SG	2,5,10	50,20	1990
	Sri Lanka	Supia SL		200	1998
	Tailandia	Baht		500	1996
	Taiwan	Dólar TW		50	1999

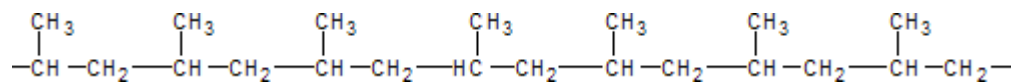
Continentes	País	Moneda	Denominación		Año de emisión
			En circulación	Commemorativo	
	Vietnam	Dong	10 000, 20 000, 50 000, 100 000, 200 000, 500 000	50	2003
Europa	Irlanda del Norte	Libra		5	1999
	Rumanía	Leu	1,5,10,50,100,200,500	2000	1999
América	Brasil	Real		10	2000
	Canadá	Dólar CAN	5,10,20,50,100		2011
	Chile	Peso	1000, 2000, 5000		2004
	Costa Rica	Colón	1000		2009
	Guatemala	Quetzal	1,5		2007
	Honduras	Lempira	20		2010
	México	Peso	20, 50	100	2002
	Nicaragua	Córdova	10, 20, 50,200	50	2009
	Paraguay	Guaraní	2000		2009
	Rep. Dominicana	Peso de oro	20		2010
África	Mozambique	Metical	20, 50, 100		n.d.
	Nigeria	Naira	5, 10, 20, 50	50	2010
	Zambia	Kwacha	500, 1000		2003

2.4.3.2 Extracción de petróleo y producción de polipropileno

En la actualidad la extracción y comercialización de petróleo es una de las actividades económicas de mayor importancia a nivel mundial. La exploración, perforación y extracción son las primeras etapas de la industria del petróleo en las cuales se utilizan grandes cantidades de agua para aumentar la rentabilidad de un yacimiento mediante sistemas de inyección, requiriéndose entre 9,000 y 29,000 m³ de agua para la fracturación hidráulica de un solo pozo, a lo cual se le añaden aproximadamente 7,000 litros de agua necesarios para refinar un galón de petróleo (Comimsa, 2013). El agua después de su uso queda contaminada y constituye por lo general el mayor residuo generado. En la exploración y extracción también se producen grandes cantidades de desechos sólidos conocidos como residuos de perforación, generando un riesgo para la salud humana y para el ecosistema en general.

Como producto derivado del petróleo se obtiene el polipropileno, el cual hoy en día es considerado como uno de los productos termoplásticos de mayor aplicación, debido a su gran versatilidad. Se utiliza ampliamente como material de embalaje para el envasado de productos de consumo humano y se produce normalmente en grandes rollos. Es un producto inerte, reciclable, su incineración no produce efectos contaminantes y la tecnología de producción usada es de bajo impacto ambiental. El polipropileno es un termoplástico semicristalino que se produce polimerizando propileno en presencia de un catalizador estereo específico, los altos rendimientos de la reacción han permitido su rápida explotación comercial.

El polipropileno de mayor interés fabricado de manera industrial es conocido como polipropileno isotáctico y consiste en un polímero lineal de hidrocarburos saturados, en donde cada dos átomos de carbono de la cadena principal posee una ramificación de un grupo metilo, su disposición espacial ordenada confiere al material excelentes propiedades físicas, como gran flexibilidad y resistencia a la fatiga. La polimerización emplea catalizadores de coordinación, los cuales son compuestos de metales de transición. La reacción suele terminarse por transferencia debido a la acción de agentes como el hidrógeno; su fórmula química es:



Para realizar el proceso de obtención del propileno se emplean lavadores o columnas en los cuales se evaporan los compuestos con menor punto de ebullición como el metano y el hidrógeno, mientras que los componentes con alto punto de ebullición se depositan en el fondo de la columna. Posteriormente se emplea una columna para separar el propileno del propano.

Los procesos de producción de polipropileno más usados a nivel industria emplean propileno de alta calidad mediante suspensión y en fase gas. Los procesos de suspensión están diseñados para que la reacción tenga lugar en un hidrocarburo líquido, en el que el polipropileno es prácticamente insoluble y se desarrolla a una temperatura inferior a la de fusión del polímero. Se pueden utilizar una amplia gama de reactores y diluyentes. Los procesos en fase gas están caracterizados por la ausencia de disolvente en el reactor de polimerización y presentan la facilidad de emplearse en producción de copolímeros con alto contenido en etileno. Una vez obtenido el polipropileno, cuando este se encuentra aún caliente es sometido a un proceso de extrusión donde se refrigera y se extrae de manera sólida para posteriormente realizar un proceso de troceado convirtiéndolo en pequeños granos que sirven como materia prima en la fabricación de toda clase de productos (Textos científicos, 2013).

2.4.3.3 *Proceso de fabricación del billete de polímero*

El BOPP (Polipropileno Biaxialmente Orientado) o sustrato Guardián® producido por “Innovia Security” (Innovia Security, 2015) se obtiene de la extrusión y estiramiento del polipropileno. La orientación biaxial aumenta la fuerza y la claridad. Los granos de polipropileno se funden en grandes contenedores, luego pasan a la etapa de enfriado la cual se lleva a cabo mediante agua y una caída en cascada del polímero. Posteriormente por medio de una máquina de extrusión con una combinación de temperatura y presión de aire se genera una burbuja gigante, de aproximadamente 20 metros de altura. El espesor de las paredes de la burbuja se determina por medio de presión y se controla mediante una máquina de rayos infrarrojos. Cuando el material ya se encuentra en condiciones óptimas se genera una fina película, que es cortada y recolectada en grandes bobinas de 8 km de longitud con peso de 1 ½ tonelada.

El proceso de burbuja produce una película de polipropileno orientado biaxialmente, en el que las moléculas quedan orientadas de forma equilibrada tanto en dirección longitudinal como en la transversal. Este proceso confiere al material las propiedades físicas necesarias para la fabricación de billetes.

Posteriormente atraviesa la etapa opacificante, en la cual se aplican varias capas de tinta blanca a cada lado, para crear una película opaca que permite la adhesión de tintas, a excepción de un área que es deliberadamente dejada en tono transparente, lo cual más tarde formará la ventana de seguridad. Acto seguido, el sustrato es cortado en hojas adecuadas para la máquina de impresión, en la cual se estampan primeramente los fondos, luego el grabado, los folios y finalmente, se cubren con una capa protectora que le proporciona más durabilidad (Substances & Technologies, 2014).

2.4.3.4 Ventajas y desventajas del billete de polímero

Es un material no fibroso y poco poroso, completamente impermeable, flexible y con gran resistencia a la fatiga. A través de pruebas de laboratorio se ha evaluado su rendimiento bajo condiciones extremas: los billetes de polímero resistieron temperaturas de hasta 120°C sin sufrir daños significativos. Sin embargo, la prueba real es el uso diario de los billetes (Reserve Bank of Australia, 2013).

El tiempo que los billetes de polímero permanecen en circulación en principio es mayor que sus equivalentes en papel, lo que resulta en una potencial disminución en el impacto ambiental y una reducción de costos de producción y de sustitución, además de que al final de su vida útil puede recibir un tratamiento de reciclaje.

Otro aspecto importante es que el clima tropical o climas extremos representan un ambiente desafiante para los billetes, especialmente por la humedad y temperaturas altas. Esto causa que los billetes de papel absorban la humedad, se ensucien y se desgasten rápidamente. El polímero en cambio, no absorbe la humedad y es completamente resistente a altas temperaturas.

Otra característica es que los billetes impresos en sustrato de polímero ofrecen la posibilidad de ser reciclados y convertidos en otros productos de plástico. Mediante un proceso particular, los productos de desecho generados durante la impresión y eliminación de billetes no aptos para la circulación se recolectan y son vendidos a recicladores para su re-extrusión en una gama de productos útiles. Esto incluye equipos de jardín, cajas de CD, percheros y otros productos resistentes tanto domésticos como industriales (Giusti and Vásquez, 2013).

Por otro lado aun y cuando el polímero presenta ventajas sobre el papel AD el desvanecimiento o desprendimiento de las tintas así como su poca resistencia a las rasgaduras representan desventajas significativas para este sustrato.

No obstante que varios países a nivel internacional han obtenido resultados favorables con el uso del billete de polímero se presentan casos como el del Banco de Tailandia que luego de un periodo de prueba realizado mediante la circulación del billete de polímero en el cual este sustrato no mostró el comportamiento esperado, se optó por la adopción del sustrato de papel AD. En 1996 el Banco de Tailandia, después de una investigación acerca de sustratos más duraderos, emitió dos billetes conmemorativos en sustrato de polímero, 500 baht y 50 baht, los cuales tuvieron una aceptación positiva por parte del público. Tiempo después emitió un billete no conmemorativo de 50 baht en sustrato de polímero.

A raíz de una encuesta de opinión realizada se detectó que la población y los profesionales del manejo de efectivo tenían una preferencia baja por los billetes de polímero, debido a que se observó que en la practica

la resistencia del billete era muy baja, ya que la impresión calcográfica se desprendía del polímero debido al roce y los dobleces que sufren durante la etapa de circulación. Además de presentar deformaciones físicas y encogimiento debido al calor excesivo, eliminando la posibilidad de recuperar su forma original, lo cual imposibilitaba su procesamiento por medio de máquinas. Por esta razón el Banco de Tailandia optó por la puesta a prueba de un papel de alta durabilidad compuesto 100% de algodón e incorporando un barniz, lo cual presentó ventajas significativas en las pruebas de simulación realizadas. Luego de una prueba de circulación controlada, el Banco de Tailandia en el año 2004, decidió cambiar toda su denominación a sustrato de papel de alta durabilidad (Sa-nguandekul, 2011).

De igual manera el Banco Central de Brasil y el Banco Central de Bangladesh después de evaluar el billete de polímero mediante una prueba de circulación en gran escala, han decidido retornar al papel de algodón (Trujillo Morejón, 2004).

Existen ventajas y desventajas referente a cada tipo de sustrato, por lo cual la decisión final radica en el peso que cada Banco Central le dé a cada una de ellas (Galán & Negueruela, 2009).

2.4.4 Fabricación de tintas de impresión

Dentro de la impresión, las tintas no solo desempeñan la función de colorear el papel, sino también actúan como vehículo de colores y proporcionan seguridad al billete. Cada tipo de tinta se formula en relación a la función que debe cumplir. Adicionalmente las tintas deben de reunir características específicas en materia de salud y legislación ambientales para salvaguardar el bienestar de los ciudadanos y medio ambiente.

Dentro de la formulación de las tintas de impresión se debe definir el tamaño de pigmento, reología, viscosidad y química de secado, lo cual es necesario para satisfacer el rendimiento de la impresión industrial de diferentes procesos de impresión como calcografía, offset, flexografía y tipografía.

Las tintas están compuestas por tres elementos:

Pigmentos: Partículas sólidas insolubles las cuales proporcionan el color, opacidad o transparencia deseados. Los pigmentos de color pueden ser de origen orgánico, obtenidos a través de síntesis química o inorgánica que son combinaciones de óxidos, hidróxidos y carbonatos entre otros.

Vehículos: Proporcionan la función de trasladar el pigmento desde una fuente hasta el sustrato, aportan fluidez, movilidad, elasticidad y resistencia. Se componen básicamente por aceites vegetales, aceites minerales producto de la destilación del petróleo y resinas tanto naturales como sintéticas.

Aditivos: Son empleados para modificar las características reológicas de las tintas, como la viscosidad, la pegajosidad o tack, el tiempo de secado y la resistencia. Entre ellos podemos encontrar barnices, ceras y catalizadores como el cobalto, circonio, manganeso, perborato y acetato de cobalto (SICPA, 2013).

2.4.5 Proceso de fabricación de los billetes del Banco de México

La fabricación de billetes comienza con la programación de actividades encaminadas a fabricar la cantidad de piezas consideradas en la orden de producción de cada año. Esta información es previamente proporcionada por el Banco de México a la Fábrica de Billetes, tomando en cuenta las denominaciones que se requieren en todo el país, los costos de fabricación y la cantidad de billetes que deben ser remplazados.

El proceso de fabricación se realiza con la más alta tecnología, cuidando las características de seguridad y durabilidad de los billetes, así como los costos de producción, es por eso que los insumos para la producción de billetes sólo pueden ser adquiridos por bancos centrales o imprentas autorizadas (Banco de México, 2013).

Las etapas de producción de los billetes son:

Diseño

En primera instancia se debe seleccionar el tema principal que llevará el billete, eligiendo imágenes y elementos relacionados con obras de arte, vida y obra de personajes históricos y sitios geográficos entre otros.

Se desarrollan varias propuestas gráficas considerando la protección contra falsificadores y facilidad para manipular e identificar la denominación. Estas propuestas de diseño se presentan a la Junta de Gobierno del Banco de México para su aprobación (Banco de México, 2013).

Fabricación

Cuando el diseño finalmente es aprobado se seleccionan las materias primas más adecuadas para la fabricación del billete, las cuales consisten en el sustrato, que puede ser de papel de algodón o polímero y las tintas de seguridad.

El sustrato debe cumplir con las características de seguridad y durabilidad determinadas por el Banco de México, para lo cual es sometido a diversas pruebas de control de calidad. Las tintas incluyen elementos de seguridad como magnetismo, fluorescencia y cambio de color; estas deben superar las pruebas de control de calidad que consisten en la verificación de diversas características fisicoquímicas (Banco de México, 2013).

Impresión

Este proceso consta de cuatro etapas:

La **impresión de fondos** o impresión offset, para lo cual es necesario contar con los diseños computarizados, los cuales son transferidos a unas láminas que son montadas en una máquina para imprimir simultáneamente tanto el anverso como el reverso en una hoja de sustrato, para lograr el elemento de seguridad llamado registro perfecto.

Acto seguido se procede a la **impresión de grabados** o impresión con calcográfica para lo cual, previamente se trazan las imágenes con ayuda de programas especializados; las imágenes se imprimen en una película transparente y después por medios fotográficos y químicos, se trasladan a una placa metálica, donde quedan grabadas en bajo relieve con las texturas y sombras necesarias. A partir de la placa original se obtienen las planchas que contienen 50 o 60 imágenes iguales, las cuales se montan en la máquina de grabados, aplicando grandes toneladas de presión sobre el sustrato.

Posteriormente se procede a la **numeración** o impresión tipográfica, que consiste en imprimir el número de folio correspondiente a cada billete, el cual lo hace único e irrepetible. Este proceso se realiza mediante una máquina que imprime números distintos a cada billete por medio de una foliadora, verificando computacionalmente que cada billete tenga un número distinto.

El último proceso consiste en el **recubrimiento** del billete con un barniz transparente, o impresión flexográfica. Esto se realiza con el objeto de aumentar su durabilidad (Banco de México, 2013).

Procesos Finales

De cada hoja impresa se obtienen de 50 a 60 billetes, según la denominación. Estas hojas se colocan en máquinas examinadoras que pueden revisar hasta 40 billetes por segundo, verificando la calidad de la imagen y todos los elementos de seguridad. Los billetes que no cumplan con alguna de estas características se destruyen dentro del mismo proceso, mediante máquinas procesadoras que transforman el billete en delgadas tiras de papel u hojuelas.

Los billetes sin defectos se agrupan de cien en cien y son colocados en una banda de papel. Este empaque se conoce con el nombre de fajilla, las cuales se agrupan para formar un mazo de mil piezas o diez fajillas. Al mazo se le coloca un código de barras para su rastreo e identificación. Posteriormente, cinco de esos mazos son flejados para formar un paquete. Cada paquete se identifica con un código de barras. Se arman bolsas con 5 o 6 paquetes; es decir, con 25 mil o 30 mil billetes. Finalmente, se colocan diez bolsas para formar un contenedor con 250 mil o 300 mil billetes. Estos contenedores también tienen un código de barras que registran información referente a la denominación, la serie de folios, los trabajadores que intervinieron en su armado, entre otros datos.

La Fábrica de Billetes entrega estos contenedores a la Caja Principal del Banco de México. Esta entidad es responsable de distribuir los billetes por todo el país (Banco de México, 2013).

Distribución

Para minimizar costos y atender todas las necesidades referentes a los billetes, Banco de México cuenta con un esquema de distribución en el que participan su Oficina Central y seis sucursales del propio banco, llamadas Cajeros Regionales, las cuales, están ubicadas estratégicamente en el territorio nacional y a su vez distribuyen los billetes a sus respectivos Corresponsales. Éstos actúan a nombre de Banco de México y son administradas por el mismo Banco Central, ya sea directamente por la Oficina Central o por alguna de la Cajas Regionales.

La Oficina Central envía billetes por vía terrestre o aérea tanto a las Cajas Regionales como a sus Corresponsales. De este modo, los bancos comerciales pueden acudir a una sucursal del Banco de México para retirar billetes. Posteriormente, los bancos entregan o reciben los billetes del público a través de sus ventanillas y cajeros automáticos. Gracias a este esquema de distribución, se cubre en su totalidad el territorio nacional (Banco de México, 2013).

Retorno y Destrucción

Una vez en circulación, los billetes tienen un desgaste continuo; su grado de deterioro también depende del clima, la humedad, la región y la denominación.

Cuando los billetes regresan a los bancos comerciales ya sea a través de depósitos o pagos, éstos separan los billetes que presentan claras muestras de suciedad, desgaste o maltrato de los que pueden volver a circular. Para auxiliar a los bancos en esta tarea, Banco de México los capacita y les entrega un muestrario impreso de selección de billetes, que también se utiliza en el propio Banco Central. Los billetes deteriorados regresan a la Fábrica de Billetes del Banco de México en forma de depósitos, en donde se cuenta con equipos lecto-clasificadores para verificar y destruir billetes, los cuales comprueban la autenticidad de los billetes y destruyen las piezas deterioradas, las que presentan un alto grado de suciedad y las de dudosa autenticidad. Aquellos billetes que hayan sido rechazados en las sucursales y que se requieran destruir, se inutilizan y se envían a la Oficina Central, en donde finalmente son destruidos, mediante máquinas procesadoras que transforman el billete en delgadas tiras de papel u hojuelas (Banco de México, 2013).

2.4.6 El billete de polímero en México

En vista de las innovaciones tecnológicas y la introducción de nuevos sustratos alternativos al papel de algodón en el mercado internacional, en el año 1996, el Banco de México despierta un interés por el sustrato polimérico. Se llevaron a cabo pruebas y análisis a tres diferentes materiales, el primero llamado DURANOTE producido por Akro-Mobile, que estaba formado por la unión de dos capas de polímero, otro llamado LUMINUS, producido por Domtar, el cual consistía en una delgada capa de polímero cubierta por ambos lados con capas de algodón y un tercer producto llamado GUARDIAN®, producido por Innovia Security, consistente en un polímero creado de tal forma que los monómeros se encuentran distribuidos de manera perpendicular. De esta manera, con base en los resultados obtenidos en las pruebas se eligió el sustrato GUARDIAN®.

Tiempo después, en el año 2000, el Banco de México comenzó un proyecto de investigación sobre la viabilidad de implementar sustratos alternos con el propósito de incrementar la durabilidad y mejorar la calidad del billete de menor denominación. Al respecto de este cambio surgían muchas interrogantes para Banco de México, debido a que no se contaba con la certeza de si la decisión llevará a una mayor durabilidad del producto, si realmente ayudaría a enfrentar el problema de la falsificación en el país o simplemente, si la población los aceptaría. Aunado a esto se presentaba la problemática de la adecuación del proceso productivo del banco, los costos y beneficios tanto en materias primas como en equipo, así como la capacitación de los trabajadores. En virtud a lo anterior, Banco de México definió un proyecto que contenía las siguientes etapas: un estudio costo beneficio, una prueba semi-industrial de impresión en la Fábrica de

Billetes del Banco Central, una prueba de circulación a nivel nacional con el público, los procesadores de efectivo y la banca comercial; y así presentar resultados a la Junta de Gobierno Central y tomar una decisión (Banco de México, 2014).

Factibilidad económica del sustrato de polímero

El Banco de México llevó a cabo un análisis considerando los costos directos de producción, una estimación de la disminución de la productividad y el costo de distribución, obteniendo que si la vida del polímero fuera al menos 2.2 veces mayor que la vida promedio del billete de fibra de algodón correspondiente, el proyecto sería económicamente viable. Luego del estudio, resultó que la vida media para el billete de polímero dio como resultado una durabilidad promedio de 3.5 veces más que la del billete de papel correspondiente y se estimó que la vida promedio de 3.2 y 3.8 veces la del papel de algodón. La vida media del billete de 20 pesos cambió de 8.3 meses a 28.8 meses en promedio (Banco de México, 2014).

Pruebas semi-industriales y factibilidad de producción

Para evaluar el nuevo material, el Banco de México realizó pruebas de impresión con el sustrato GUARDIAN®, las cuales produjeron resultados importantes sobre el comportamiento del polímero en las máquinas de impresión y se implementó el proceso de recubrimiento para el nuevo billete en función de la altura de la Ciudad de México, que supera los dos mil metros sobre el nivel del mar y produce un comportamiento diferente en el secado del barniz.

El Banco de México decidió recurrir a la estrategia de implementar el sustrato de polímero, pero conservar el mismo diseño, de tal manera que el nuevo billete siguiera perteneciendo a la familia en circulación; por lo cual fue necesario realizar cambios en el grosor y distancia entre las líneas de diseño de las placas de impresión, para que la apariencia final fuera similar a la del billete que circulaba en papel (Banco de México, 2014).

Prueba de circulación

Esta prueba se inició en septiembre del 2002 con el análisis de las diferentes condiciones climáticas en el país y de las costumbres de uso de los billetes entre sus habitantes. Se realizó también, una sustitución completa del billete en circulación, por medio de la constitución de un inventario de la denominación, de tal manera que al cabo de 8 meses se habían sustituido prácticamente todos los billetes de fibra de algodón de \$20, lo cual sumaba una cantidad de 200 millones. Esto permitió que toda la población conociera inmediatamente el nuevo billete y que la estimación de la vida promedio no tuviera distorsión derivada del uso simultáneo de dos sustratos diferentes (Banco de México, 2014).

Encuestas

Para conocer la magnitud el aspecto cultural debido a la decisión de cambio de sustrato, se realizaron estudios de opinión mediante encuestas dirigidas al público en general y encuestas al sector financiero.

Un año después de iniciada la prueba de circulación, se realizó una encuesta que incluyó a 2,200 hogares, en ciudades con población mayor a 50,000 habitantes. Entre las preguntas de dichas encuestas se encontraba una que daba al usuario la opción de elegir entre una moneda metálica, un billete de polímero o uno de papel, todos de denominación de 20 pesos, a lo que el 59% de la población encuestada prefirió un billete de polímero, el 22% un billete de papel y un 18% una moneda metálica. Así mismo se preguntó sobre el deseo de la población de que otra denominación se imprimiera en polímero, a lo que un 68% mencionó que sí y el resto que no.

Quince meses después se levantó una encuesta al sector bancario para conocer la opinión acerca del desempeño del nuevo billete, obteniendo que el 92% de las personas encuestadas lo consideraba más limpio, el 64% de mejor calidad y el 94% más durable, sin embargo, la encuesta mostró que el 45% de los encuestados encontraban su manejo más dificultoso que el de algodón, el 23% más lento y un 15% igual. No obstante, la opinión general del sector financiero fue positiva y la mayoría también recomendaba que otra denominación fuera impresa en polímero (Banco de México, 2014).

Procesamiento de los billetes de polímero

Referente al deterioro de los billetes se tomó en cuenta que es diferente la forma en la que se deteriora un billete de algodón al de polímero, por lo cual el Banco Central tuvo que difundir un nuevo estándar para billete “apto” y “no apto”. Al cabo de un tiempo se comenzó a notar que los depósitos de billete deteriorado cambiaron, el número total de billetes recibidos disminuyó considerablemente (Banco de México, 2014).

Falsificaciones

A pesar de que el número de piezas falsas que se detectaban año con año, en la denominación de \$20 no era una cifra muy alta, se observó una drástica disminución de falsificaciones en los años posteriores. En noviembre del 2006 se emitió el billete de \$50 en polímero, esta denominación era la más falsificada en México. Esto ocasionó que al año siguiente de emitido el billete de polímero, la denominación pasara a ocupar el tercer lugar en falsificación y en el año 2008 pasó a ser la cuarta. Por lo cual se observa que la implementación del billete de polímero ha representado en el país una barrera importante para los sistemas de falsificación cada vez más complejos (Banco de México, 2014).

Resultados obtenidos en el estudio

En virtud de lo anterior, Banco de México comprobó su acierto en la decisión de cambiar dos de sus denominaciones a sustrato de polímero pues actualmente emite un billete más limpio, económico, menos perjudicial para el medio ambiente y más seguro.

Así, desde septiembre de 2002, se encuentra circulando el billete de polímero de \$20 y desde noviembre del 2006, el billete de polímero de \$50 pesos. En septiembre de 2009, el Banco Central emitió billetes de polímero de \$100 con carácter conmemorativo.

Desde que se introdujo el sustrato de polímero en la circulación, la participación de los billetes impresos en ese material se ha incrementado sustancialmente como porcentaje del total en circulación. En diciembre del 2003 la participación de billetes de polímero en la circulación total correspondía al 10% y para agosto 2012 ya representaba cerca del 40%.

Por su parte, la duración promedio en el caso del billete de \$20 pesos aumentó de nueve meses a 29. En el caso del billete de \$50 pesos, la vida útil promedio subió de 14 meses a 35 meses. La denominación de \$100 pesos aún circula en papel de algodón tradicional y su vida promedio es de 19 meses. En tanto, las mayores denominaciones que corresponden a \$200, 500 y 1000 pesos y que también circulan en billetes de papel de algodón, tienen una vida promedio superior a los 30 meses (Banco de México, 2014).

Aunado a los parámetros económicos y sociales analizados en el estudio antes mencionado, es de suma importancia incluir también la viabilidad ambiental en la implementación de nuevos materiales para la fabricación de billetes y para esto es necesario considerar el medio ambiente desde una perspectiva integral que permita evaluar los impactos generados a todos los vectores involucrados, como lo son el aire, agua y suelo evitando transferir problemas ambientales de un sistema a otro. Para lograr lo anterior es necesario analizar todos los procesos involucrados en el desarrollo y producción de billetes, por lo cual se recurre a la perspectiva holística que ofrece el Análisis de Ciclo de Vida para determinar y cuantificar impactos asociados a un producto.

2.5 Análisis de Ciclo de Vida

Para el desarrollo de este proyecto se aplicó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que de acuerdo a la Norma ISO 14040 (ISO, ISO 14000 Environmental Management, 2006), se define como una metodología para determinar los efectos en materia ambiental asociados a un producto o servicio: compilando un inventario de entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando su potencial impacto ambiental, e interpretando los resultados del análisis de cada etapa de vida del producto en relación con los objetivos del estudio planteado.

ACV permite comparar dos o más productos o servicios diferentes, siempre y cuando tengan la misma función, así como facilita la identificación de áreas de mejora en el proceso de producción. Es un estudio sistemático y detallado, por lo que es fundamental seguir cada una de las siguientes etapas.

2.5.1 Etapas de ACV

ACV se integra con base en las siguientes etapas:

- Definición de objetivo y alcance
- Análisis del inventario del ciclo de vida
- Evaluación del impacto de ciclo de vida
- Interpretación del ciclo de vida

En la Figura 2.15 se ilustran las etapas de ACV, así como la conexión entre ellas, mostrando que se trata de un proceso iterativo, el cual permite incrementar el nivel de detalle en sucesivas iteraciones.

Definición del objetivo y alcance: Se debe establecer el propósito del análisis, el rumbo y la extensión del mismo, así como:

- **Sistemas estudiados.-** Productos o servicios que se analizarán y compararán.

- **Unidad funcional.-** Es el elemento clave del estudio, debe ser precisa y suficientemente comparable para ser utilizada como referencia. Debe definir la cantidad de productos o servicios necesarios para cumplir el objetivo del estudio en función de los bienes que se comparan y a partir de esto se cuantifican las entradas y las salidas de cada sistema.
- **Límites del sistema.-** Se debe determinar claramente qué unidades de procesos se incluirán en el estudio, con base en el objetivo establecido. En virtud de que ACV es un estudio holístico, puede resultar muy extenso y complicado de llevar a cabo, es por esto que los límites del sistema deben ser claros y precisos, identificando qué procesos unitarios deberán incluirse en el ACV, respecto a la aplicación prevista del estudio (Güereca Hernández, 2006).

Inventario del ciclo de vida (ICV): Comprende la obtención de datos para cuantificar las entradas y salidas relevantes del sistema, tomando como referencia la unidad funcional. Esas entradas y salidas incluyen el uso de recursos y las emisiones al aire, agua y suelo asociadas con el sistema a lo largo del ciclo de vida del producto, en todas sus etapas. Cabe destacar que la validez de los resultados depende en gran parte de la calidad y veracidad de los datos utilizados para desarrollar el inventario, es necesario tener en cuenta parámetros como: cobertura de tiempo, cobertura geográfica, cobertura tecnológica, representatividad de los datos, consistencia y reproducibilidad de los métodos utilizados para la obtención de los mismos. La utilización de datos de otros estudios puede simplificar el trabajo, teniendo especial cuidado en que sean representativos.

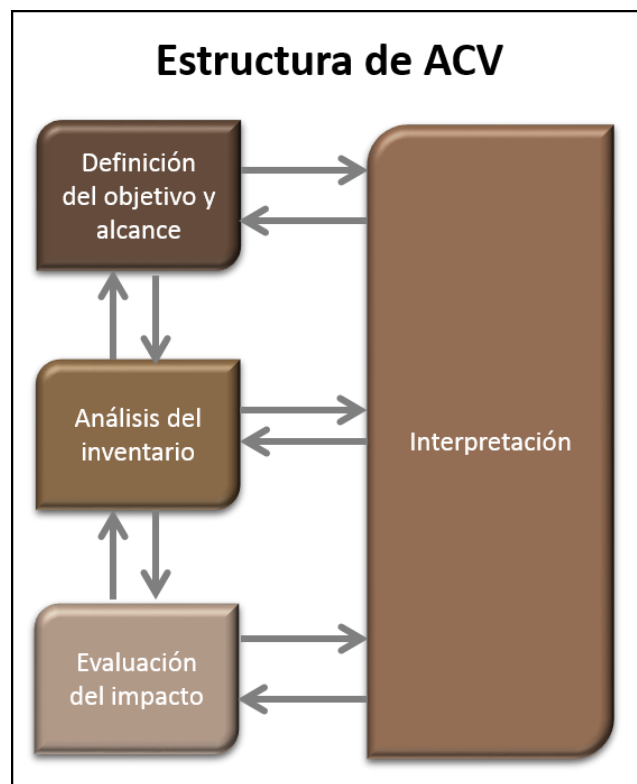


Figura 2.15 Fases de un Análisis de Ciclo de Vida.
Fuente: Adaptado de ISO 14040 (ISO, 2006)

Según la norma ISO 14041, el análisis del inventario es una lista cuantificada de todos los flujos entrantes y salientes del sistema durante toda su vida útil, los cuales son extraídos del ambiente natural o bien emitidos a él, calculando los requerimientos y eficiencia energética, materiales del sistema y emisiones producidas en cada uno de los procesos unitarios (ISO, ISO 14000 Environmental Management, 2006).

Evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV): En virtud de los resultados obtenidos en el análisis del inventario, la EICV valora los efectos ambientales generados por cada proceso unitario en la fabricación de los productos analizados, estableciendo categorías de impacto en función del objetivo y alcance del estudio basándose en los grupos definidos según (SETAC, 2002): Consumo de recursos, impactos al ecosistema y daños a la salud.

El propósito de EICV es determinar la importancia de los elementos considerados en el inventario, para cuantificar el efecto que cada proceso unitario está generando con base en las categorías de impacto de interés y así poder comparar los procesos de producción y el producto final. De esta manera es posible generar un conjunto de indicadores que faciliten el manejo y conocimiento del proceso, así como la toma de decisiones.

ISO 14042 (ISO, ISO 14000 Environmental Management, 2006), define los elementos obligatorios de la EICV de la siguiente forma:

- **Selección.**- En este paso se seleccionan las categorías de impacto y los métodos de caracterización que se van a considerar en el estudio.
- **Clasificación.**- Es la asignación de los datos del inventario a las diferentes categorías de impacto, tales como calentamiento global, disminución de la capa de ozono, entre otros.
- **Caracterización.**- Se refiere al cálculo del indicador de impacto para cada una de las categorías de impacto seleccionadas, usando factores de caracterización.

Los elementos opcionales de la EICV también son definidos por la norma ISO 14042 (ISO, ISO 14000 Environmental Management, 2006), de la siguiente manera:

- **Normalización.**- Es el cálculo de la magnitud del indicador de impacto. Para ello se usa información de referencia, como las emisiones en un área determinada, previamente caracterizadas por el mismo método.
- **Agrupación.**- Es el proceso de clasificar por grupos de impacto similar o por categorías en una jerarquía determinada (alta, media o baja prioridad).
- **Valoración.**- Consiste en establecer factores que otorgan una importancia relativa a las distintas categorías de impacto para después sumarlas y obtener un resultado ponderado en forma de un único índice ambiental global del sistema.

Interpretación del ciclo de vida: La última etapa de ACV es la interpretación, en la cual se evalúan los resultados y se plantean conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones, de forma consistente con el objetivo y alcance del estudio (ISO, 2006).

Consiste en la evaluación de las necesidades y posibles mejoras para reducir las cargas ambientales asociadas con el consumo de energía, de materias primas y el impacto ambiental que se genera durante el ciclo de vida de un producto o servicio.

2.5.2 Antecedentes de ACV

El primer estudio que tomó en cuenta el impacto ambiental de un producto en forma global tuvo lugar en 1969, y en él se analizaron las cantidades de energía y material necesario para la fabricación de productos, así como el impacto ambiental que generaba dicho producto en todas sus etapas de vida comparando diferentes envases, para Coca Cola Company (Hunt & Franklin, 1996).

De esta manera se fueron desarrollando poco a poco estudios con el objetivo de analizar en una forma integral los impactos que genera la producción de bienes y servicios. Es hasta 1991, cuando la EPA inicia actividades en ACV con el interés primario de asistir en el desarrollo de guías y bases de datos para uso del sector público y privado (Hunt & Franklin, 1996), dos años después en 1993 esta misma agencia publica un documento guía para el inventario de ACV y en 1997 se publica la serie de normas ISO 14040 referente a ACV.

El concepto de Análisis de Ciclo de Vida se adoptó internacionalmente en el año 1990, como resultado del Primer Taller de la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC).

Con un rápido progreso y difusión de esta metodología, para el año 2002 ya se habían realizado ACV en todo el mundo y se conformaron asociaciones por regiones las cuales comenzaron a desarrollar investigación y aplicación de esta herramienta.

Para el año 2006, se publica la nueva serie de normas ISO 14040/14044, con una reestructuración y adecuación de la serie anterior.

En México, se divulga el primer artículo de Análisis de Ciclo de Vida, en el año 2002 (Dante et al., 2002) y posteriormente se realizaron las siguientes actividades (Suppen, 2005):

- Base de datos para el inventario de ciclo de vida.
- Diseño del ciclo de vida para el cumplimiento ambiental.
- Estudio para la evaluación del ciclo de vida de los productos mexicanos.
- Estudios y proyectos de ACV en el sector minero.
- Estudio de ciclo de vida para las botellas de resina PET.
- Base de datos para el inventario de ciclo de vida en el sector eléctrico.

2.5.3 Acerca de ISO

La Organización Internacional de Normalización (ISO) es una federación mundial de organismos nacionales de normalización que a través de los comités técnicos preparan las normas internacionales. Cada organismo miembro interesado en una materia para la cual haya establecido un comité técnico, tiene derecho a estar representado por dicho comité. Las organizaciones internacionales, públicas y privadas, también

participan en el trabajo. ISO es un organismo privado para la elaboración de normas internacionales, integrado principalmente por los organismos nacionales de normalización de cada país.

La tarea principal de los comités técnicos es preparar normas internacionales. Los proyectos de normas internacionales aceptados por los comités son enviados a los organismos miembros para votación. La publicación como norma internacional requiere la aprobación por al menos el 75% de los organismos miembros requeridos para votar.

La norma ISO 14044 fue preparada por el Comité Técnico ISO/TC 207, gestión ambiental.

En 1993, la ISO creó el comité técnico ISO/TC-207 para el desarrollo de la serie ISO 14000 sobre sistemas de gestión ambiental y herramientas de apoyo. Dentro de este alcance dicho comité trabaja la serie de normas ISO 14040 sobre ACV, las cuales se publicaron en el año 1997. En la Tabla 2.2 se presenta un breve semblanza de la normativa de ISO 14000 (ISO, ISO 14000 Environmental Management, 2006).

Tabla 2.2 Normas ISO 14000
Serie ISO 14040 sobre ACV

Serie ISO 14040 sobre ACV	
ISO 14040:2006	<i>Principios y marco de referencia.</i> - Esta norma establece los principios y marco de referencia para llevar a cabo un ACV, describe las fases claves del proceso de ACV. Se recomienda usarla junto con ISO 14044.
ISO 14044: 2006	<i>Requisitos y lineamientos.</i> - Esta norma establece los requisitos y orientaciones para llevar a cabo un ACV. Se recomienda utilizarla junto con ISO 14040.
ISO/TR 14047: 2003	<i>Ejemplos de aplicación de ISO 14042.</i> - Ofrece ejemplos del empleo del ACV. ISO 14042 se eliminó en el 2006, pero su contenido se incorporó en las versiones de ISO 14040 e ISO 14044.
ISO/TS 14048: 2002	<i>Formato para la documentación de datos.</i> - Ilustra los formatos para la recolección de información con énfasis en la fase del inventario de ciclo de vida (recopilación de las entradas y salidas de los procesos).
ISO/TR 14049: 2000	<i>Ejemplos de aplicación de ISO 14041 para la definición del objetivo, alcance y análisis del inventario.</i> - ISO 14041 se eliminó en el 2006, pero su contenido se incluyó en las versiones del 2006 de ISO 14040 e ISO 14044.

Fuente: Adaptado de (Chacon, 2008) (ISO, ISO 14000 Environmental Management, 2006)

Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A.C (IMNC)

Es una asociación civil, que cuenta con el registro No. 002/C como Organismo Nacional de Normalización (ONN), para elaborar, actualizar, expedir y cancelar normas mexicanas.

La Dirección General de Planeación Ecológica (SEMARNAT), ha otorgado la aprobación al Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A.C., para elaborar actualizar, expedir y cancelar normas mexicanas, en el área ambiental.

La primera edición de la norma mexicana NMX-SSA-14044-IMNC ha sido publicada en el Diario Oficial de la Federación el lunes 16 de febrero de 2009 (IMNC, 2009).

2.5.4 Estado del ACV a nivel internacional

En la última década, la metodología de Análisis de Ciclo de Vida ha presentado grandes avances, posicionándose como una metodología holística y robusta. Actualmente existen varias iniciativas internacionales con el fin de formular recomendaciones y contribuir a su avance, tal es el caso de: el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2014), la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC, 2014) y la Plataforma Europea para ACV de la Comisión Europea (Finnveden et al., 2009).

La evaluación de sustentabilidad de los productos y servicios es normalmente realizada desde los impactos generados en tres dimensiones: social, medio ambiente y desarrollo económico (Elkington, 1998). Partiendo de las bases del ACV medio ambiental, bajo la iniciativa del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se ha desarrollado una guía metodológica para la evaluación del ACV social (SETAC, PNUMA, 2009; Griebhammer et al. 2006); para lo cual Jørgensen et al. (2008) ofrecieron una revisión del estado del arte. De la misma manera, en busca de la integración de las tres dimensiones antes mencionadas, actualmente se desarrollan diversos proyectos para la estandarización de la aplicación de la metodología, respecto a la evaluación de viabilidad de futuras tecnologías (ProSuite, 2009; Patel, 2009).

Características de ACV frente otras herramientas de evaluación ambiental

El desarrollo de productos y servicios genera un impacto al ecosistema en un punto específico de tiempo y espacio, sin embargo, estos impactos afectan a diferentes ecosistemas alrededor del mundo. En ACV no se cuenta con el conocimiento acerca de las emisiones simultáneas que efectúan otros procesos fuera del sistema analizado y no se integra información acerca de antecedentes de contaminación de otras sustancias al ambiente, por lo que ACV no es un sustituto para la Evaluación de Riesgo Ambiental (ERA). Los resultados de la evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV) reflejan las contribuciones potenciales de impactos generados puntualmente por el sistema analizado con base en la relación y validez de las condiciones de referencia asumidas en el modelo (Olsen, 2001; Hauschild, 1998; Tiruta-Barna, 2007).

ACV abarca una diversidad de impactos ambientales y puede incluir la comparación entre ellos, por lo cual es de suma importancia que el modelado se lleve a cabo con el mismo grado de realismo y confiabilidad para cada impacto, con el fin de evitar la introducción de un sesgo en la comparación entre categorías (Hauschild & Pennington, 2002).

ACV atribucional y consecencial

La fase de definición de objetivo y alcance es de especial importancia, debido a que los resultados del ACV dependen de la finalidad para la cual se desarrolle dicho estudio, por lo que es fundamental establecer las bases del análisis adecuadamente. El modelo de ciclo de vida desarrollado en un análisis de inventario debe

ser una descripción adecuada de los segmentos que conforman el sistema tecnológico ya que las partes relevantes dependen del objetivo del estudio.

Se han realizado diversos intentos para describir los tipos de ACV, distinguiendo entre dos tipos de métodos: atribucional y consecuencial.

- El ACV atribucional se define por su enfoque de describir los flujos físicos de relevancia ambiental. Intenta atribuir “pesos” asociados a la producción y uso de un producto o proceso específico en un determinado momento, generalmente en el pasado inmediato y pretende responder cómo suceden los eventos dentro del estado temporal seleccionado.
- El ACV consecuencial está diseñado para generar información sobre las consecuencias de las decisiones tomadas, se define por tratar de describir cómo los flujos de relevancia ambiental cambiarán en respuesta de posibles decisiones. Intenta identificar las consecuencias sobre el medio ambiente ocasionadas por la toma de una decisión o una propuesta de cambio en un sistema en estudio; en este caso es aquel que intenta responder cómo determinados flujos más allá del sistema inmediato cambiarán en respuesta a modificaciones específicas (Curran et al., 2007).

La terminología atribucional/consecuencial fue adoptada en 2001 en un taller acerca de los datos de electricidad de ICV en Cincinnati (Curran et al. 2005), aunque el término atribucional ya se encontraba en uso desde hace varios años.

En algunos estudios recientes se han utilizado ambos métodos en el mismo producto (Ekvall & Andrae, 2006; Thomassen et al, 2008) para ilustrar la aplicabilidad de los dos enfoques. Se ha determinado que en caso de que ninguna decisión se presente claramente es conveniente implementar el método atribucional, ya que se aplica de manera general y debido a que un modelo consecuencial carecería de sentido al no tener una decisión claramente establecida para el sistema (Lundie et al., 2007). Weidema (2003) manifiesta una postura similar al argumentar que un ACV consecuencial es relevante para la toma de decisiones; sin embargo, sostiene que es aún más importante su incorporación para aumentar la comprensión de la cadena de producto e identificar los procesos de mayor importancia en el mejoramiento del mismo, lo cual genera una base sólida para la generación de nuevas ideas de mejora.

Es importante resaltar que la elección entre un ACV atribucional o consecuencial puede influir en la definición de límites del sistema y en otras opciones metodológicas, como la definición de unidad funcional y la elección de los métodos de EICV.

Límites del sistema

Existen tres principales formas de establecer los límites del sistema en el inventario de ciclo de vida:

- *Límites entre el sistema técnico y el medio ambiente.*- El ACV cubre todo el ciclo de vida del producto o servicio. El escenario ideal consiste en que el límite referente a materias primas se remonte hasta el material que se extrae directamente de la naturaleza sin previa transformación. Las salidas deben ser, idealmente, las emisiones generadas directamente al medio sin transformaciones humanas posteriores (Finnveden et al., 2009).

En el caso de rellenos sanitarios, los límites del sistema pueden tener una dimensión de tiempo. En general se aceptan las emisiones en términos de gases y lixiviados como salida del sistema; sin embargo, en la práctica esto en ocasiones puede ser difícil, debido a la falta de datos sobre las emisiones de los rellenos sanitarios, además de que éstas pueden continuar durante periodos de tiempo muy largos que alcanzan hasta cientos de años o más (Finnveden et al., 1995). Varios investigadores han utilizado diversos límites de sistema en lo que refiere a términos de tiempo (Doka & Hischer, 2005; Obersteiner et al., 2007); algunos han incluido emisiones durante 100 años aproximadamente, otros incluyen un periodo de tiempo infinito hipotético hasta que todos los materiales del relleno han sido degradados. La inclusión de las emisiones a largo plazo y su ponderación en comparación con un corto plazo puede representar un fuerte impacto en los resultados finales (Hellweg et al., 2003). Una solución a este problema puede ser la modelación de emisiones a corto plazo (sustancias emitidas durante los primeros 100 años) y de emisiones a largo plazo, representando los resultados por separado (Finnveden et al., 1995). Otra alternativa es incluir una categoría de impacto denominada “Toxicidad almacenada” la cual tenga en cuenta el aporte de cargas tóxicas que generan los residuos al final del periodo de tiempo seleccionado (Christensen et al., 2007; Hauschild et al., 2008a).

- *Límites entre los procesos significativos y no significativos.*- El establecer esta frontera puede resultar complicado debido a que generalmente se desconocen los datos no significativos y por otra parte, una vez que se conozcan los datos de un proceso, no hay ninguna razón específica para dejarlos fuera. Un enfoque general puede ser incluir datos fácilmente accesibles y comprobar la importancia de los mismos (Lindfors et al., 1995).
- *Límites entre el sistema tecnológico de estudio y otros sistemas.*- Un ACV puede ser limitado a una tecnología de producción específica o a un nivel de tecnología, por ejemplo cuando el ACV incluye un proceso multifuncional, lo cual ocurre cuando se comparte un proceso entre varios sistemas de productos y no se tiene claro a qué producto corresponde el impacto ambiental generado (Finnveden et al., 2009).

Asignación o reparto

Los métodos de asignación y reparto es uno de los temas más discutidos en ACV (Weidema, 2003; Ekvall & Finnveden, 2001; Curran, 2007; Heijungs & Guineé, 2007; Lundie et al., 2007).

Existen tres tipos de problemas de reparto:

- *Múltiples salidas.*- El proceso produce varios productos; por ejemplo la industria petroquímica y refinerías.
- *Múltiples canales de entrada.*- El proceso recibe varios productos de desecho; por ejemplo un incinerador de residuos.
- *Reciclaje de circuito abierto.*- El proceso recibe un residuo que es convertido en otro producto, por ejemplo la incineración de residuos utilizados para la generación de energía recuperada en forma de calor y electricidad (Finnveden et al., 2009).

Hay dos maneras diferentes de manipular los procesos multifuncionales. Una de ellas es la asignación o partición de los impactos ambientales entre los productos, lo cual se puede realizar con base en principios de causa química, física (energía o masa) o de valor económico. Otro principio para evitar los problemas de asignación es dividir el proceso en subprocesos, o bien, ampliar los límites del sistema con la finalidad de abarcar las partes afectadas por otros ciclos de vida en el sistema tecnológico de estudio (Tillman et al., 1994). La norma internacional (ISO, ISO 14000 Environmental Management, 2006) proporciona algunas orientaciones sobre cómo manejar los problemas de asignación. Afirma que cada vez que sea posible se debe utilizar una subdivisión o sistema de expansión se debe utilizar para evitar dichos problemas. Sin embargo, Heijungs y Guineé (2007) argumentan que la expansión del sistema es poco práctica, ya que no elimina los problemas de asignación debido a que es probable que surjan nuevos problemas de esta índole, involucrando grandes incertidumbres. Por otra parte Weidema (2003) pretende demostrar que la expansión del sistema es una opción viable debido a que es factible que los problemas de asignación se eliminen con la aparición de nuevos problemas de menor importancia que los originales los cuales sea posible no tomar en cuenta.

Desarrollo de bases de datos de inventarios

Con la finalidad de facilitar el desarrollo del inventario de ciclo de vida y evitar la duplicación en la recopilación de datos, se han desarrollado diversas bases de datos tanto regionales como nacionales, así como bases de datos industriales que frecuentemente se ofrecen como herramientas en software de ACV.

Algunas bases de datos regionales y nacionales han evolucionado proporcionando una gran variedad de información acerca de productos y servicios básicos utilizados en ACV, como materias primas, generación de electricidad, procesos de transporte y manejo de residuos. En los últimos años han sido desarrolladas varias bases de datos, tales como: la base de datos @ CPM COLUMNNA de origen sueco (CPM, 2007), la base de datos PROBAS desarrollada por Alemania (UBA, 2007), la base de datos japonesa JEMAI-LCA Pro ver.2 (JEMAI, 2007; Narita et al., 2004), la base de datos de EE.UU. NREL (NREL, 2004), la base de datos ICV australiana (RMIT, 2007), la base de datos suiza Ecoinvent (Ecoinvent 3.0, 2013), así como la base de datos Europea (ELCD, 2007). Además de diversas bases de datos que actualmente se desarrollan en todo el mundo como: Brasil, Canadá, China, Alemania, Malasia, Tailandia y otros países.

Como complemento a las bases de datos de ACV públicas, se han sumado numerosas asociaciones empresariales internacionales, las cuales han creado sus propios conjuntos de datos de inventario para apoyar la demanda de información industrial, entre los cuales se encuentra: aluminio (CEA, 2007), cobre (Deutsches Kupferinstitut, 1995; Bruch et al., 1995), hierro y acero (IISI, 2007), plásticos (APME, 2007) y papel (FEFCO, 2006).

Así mismo, para ayudar a mantener el intercambio de datos entre las diversas herramientas y bases de datos de ACV se ha desarrollado una herramienta de conversión de formato, la cual permite convertir datos de ACV de un formato a otro (Ciroth, 2007; Formato Converter, 2008).

Actualmente en el caso de México no se cuenta aún con una base de datos pública ya que la realización de estudios de esta índole requiere de la búsqueda de información específica y de gran calidad. En este sentido se han realizado diversos esfuerzos a nivel nacional tanto en el sector público como privado, enfocados a

desarrollar proyectos encaminados a la obtención de datos, siendo necesario un proceso de conjunción y organización que armonice los datos generados.

Las bases de datos para inventarios de ciclo de vida han tenido un gran avance en los últimos 10 años, sin embargo la demanda de datos de productos y servicios sigue creciendo, por lo cual es necesario seguir desarrollando herramientas y bases de datos que permitan la construir inventarios de mayor calidad para diferentes partes del mundo.

Herramientas para modelado de subsistemas y procesos unitarios

Los ejemplos más destacados son las herramientas para gestión de residuos, por ejemplo para residuos sólidos municipales en rellenos sanitarios (Nielsen & Hauschild, 1998; Doka, 2003) así como para diversas tecnologías de incineración (Sundqvist et al., 1997; Kremer et al., 1998; Hellweg et al., 2001; Doka, 2003). Así mismo, existen herramientas para la incineración y coprocesamiento de residuos en hornos industriales modelados por (Seyler et al., 2005 a, b); herramientas para el modelado de tratamiento de aguas residuales municipales (Zimmermann et al., 1996; Doka, 2003); para la producción de sustancias químicas y tecnologías de reciclado (Jiménez - González et al., 2000); así como para la estimación de emisiones derivadas de aplicaciones de pesticidas agrícolas (Birkved & Hauschild, 2006).

Impactos de uso de suelo

El uso de suelo es un flujo elemental que repercute en una categoría de impacto, tanto por la ocupación de una extensión de tierra como por el cambio de uso en la agricultura y silvicultura, además de otras actividades como la minería y el transporte. Actualmente no existe un acuerdo sobre cómo deben ser incluidos estos impactos en un ACV. Se han sugerido varios métodos respecto a cómo manejar este tema por varios autores como Lindeijer et al. (2002); Mila i Canals et al. (2007); Pennington et al. (2004); Koellner y Scholz (2007, 2008) y Michelsen (2008).

Toxicidad

La limitada cobertura de los datos del inventario es en gran medida un problema social, ya que el conocimiento sobre el uso y destino de los productos químicos es limitado. Se han realizado esfuerzos para incluir un mayor número de emisiones potenciales con relevancia toxicológica, los cuales han demostrado que esto influye notablemente en los resultados y conclusiones del estudio (Köhler, 2006; Larsen et al, 2009). Frecuentemente se presentarán diversas sustancias en el ICV para las cuales no se encuentren disponibles bases de datos o bien, para algunas otras los modelos existentes varían sustancialmente entre distintas fuentes. Así mismo se encuentra que USEtox está destinado a ser la base de futuras recomendaciones de la iniciativa de PNUME/SETAC en la categoría de impactos toxicológicos (Rosenbaum et al, 2007; Hauschild et al, 2008b).

Incertidumbre en ACV

La incertidumbre en ACV puede ser definida de muchas maneras, una de ellas es: “incertidumbre es la discrepancia entre una cantidad medida o calculada y el valor real”. Existen diversas clasificaciones de incertidumbre en la literatura (Funtowicz & Ravetz, 1990; Morgan & Henrion, 1990; Huijbregts, 1998). Algunos ejemplos son: incertidumbre de los datos, modelo de incertidumbre, variabilidad, incertidumbre epistémica, entre otras. Los tipos de incertidumbre están relacionados con las fuentes, las cuales son elementos de entrada de ACV, por ejemplo, el uso de electricidad en una caldera de calefacción o las emisiones de CO₂ en una central de carbón. Es decir, los datos pueden mostrar variabilidad en el uso de electricidad de varias calderas similares e incluso el mismo tipo de caldera puede cambiar con el tiempo o depender de las condiciones de operación. Los datos pueden ser erróneos, incompletos o ser objeto de redondeo de cantidades. Existen muchos tipos de incertidumbre y muchos de ellos se presentan en un ACV típico.

La incertidumbre puede ser tratada de varias maneras:

- De forma científica.- Para hacer frente a grandes incertidumbres se recomienda realizar más investigación, encontrar mejores datos y desarrollar mejores modelos.
- De forma social.- Consiste en discutir las cuestiones inciertas con las partes interesadas con la finalidad de llegar a un consenso sobre los datos y las opciones presentadas.
- De manera estadística.- No se trata de eliminar o reducir la incertidumbre, sino incorporarla. La teoría estadística comprende una gran cantidad de métodos para realizarla: variación de parámetro y análisis de escenarios, teoría estadística clásica, métodos cualitativos de incertidumbre, entre otros.

2.6 El Análisis del Ciclo de Vida de billetes en el mundo

La importancia de conocer a profundidad la calidad y desempeño de los billetes ha ganado terreno a nivel mundial en los últimos años, ya que cada vez más bancos centrales se interesan en analizar su producto y proceso de fabricación, para poder evaluar el sustrato en el cual imprimen sus actuales billetes y poner a prueba nuevas alternativas, buscando siempre el cuidado del medio ambiente, la sustentabilidad y calidad en sus procesos, así como el bienestar y salud social.

Debido al creciente interés de las empresas e industrias por el cuidado ambiental y la investigación de nuevas técnicas que faciliten una producción más limpia, sustentable y responsable, en los últimos años ACV ha cobrado una importante presencia a nivel mundial en innumerables temas y aplicaciones; una de ellas y la de mayor interés en el presente estudio es el Análisis de Ciclo de Vida de los billetes a nivel mundial. En varios países se ha llevado a cabo un estudio para conocer y analizar a fondo el proceso de producción que actualmente realizan, así como para facilitar la toma de decisiones corporativas. Entre los estudios más representativos se encuentran los realizados por el Banco de Reserva Australiana (Reserve Bank of Australia, 1998), el Banco Nacional de Suiza (Swiss National Bank, 1999), el Banco Central Europeo (Banco Central Europeo, 2003), el Banco Nacional de Canadá (Bank of Canada, 2011) y el Banco Central de Inglaterra (Bank of England, 2013), todos ellos con diferentes objetivos, pero basados en la normativa que establece ISO 14040. Cabe destacar que la comparación entre resultados de los estudios mencionados no se considera conveniente ya que cada uno de ellos incorpora unidades funcionales distintas,

lo cual dificulta la comparación directa de la evaluación de Impacto obtenida. Los estudios llevados a cabo por los Bancos Centrales a nivel internacional se describen a continuación.

2.6.1 Banco de la Reserva Australiana

Durante el año 1998, el Banco de la Reserva Australiana realizó un ACV para identificar y cuantificar el impacto ambiental generado por los billetes de polímero y equiparar el grado de diferencia ambiental frente al de fibra de algodón (Reserve Bank of Australia, 2013).

El estudio incluyó la extracción y refinación del petróleo para la obtención del sustrato de polímero, así como la cosecha de algodón para la fabricación del papel; el proceso de producción de los billetes, la etapa de uso, contemplando que el billete de polímero tiene 5 veces más duración que el de algodón; la destrucción al final de su vida útil que consiste en trituración y compactación en los dos casos, así como su destino final: en el caso del billete de polímero se establece la alternativa de reciclado como materia prima para productos de consumo y para el billete de algodón, relleno sanitario o incineración.

El análisis del inventario está compuesto por los materiales e insumos de energía, así como de las salidas de cada uno de los procesos unitarios del ciclo de vida del producto, exceptuando la energía consumida en: la etapa de reprocesamiento de los billetes en servicio, la fabricación de las placas de grabado y la elaboración de la tinta requerida en el proceso de impresión. En dicho estudio se manifiesta que los últimos dos procesos mencionados son comunes para los dos tipos de billetes y su exclusión no marca una diferencia significativa en la demanda de energía del proceso de producción de los sistemas comparados.

Para analizar los datos del inventario y cuantificar el impacto ambiental generado por el ciclo de vida de estos productos, se utilizó el software SimaPro LCA (Sima Pro LCA, 2015), con la base de datos australiana Ecoinvent LCI, bajo 5 escenarios diferentes:

- Billeto de polímero.- Con una vida útil 5 veces mayor que la de los billetes de algodón, estableciendo arbitrariamente para este último un 1 año de vida; así como el reciclaje de los billetes de polímero al final de su vida útil.
- Billeto de polímero sin reciclaje.- Con una vida útil 5 veces mayor que la de los billetes de algodón estableciendo arbitrariamente para este último un 1 año de vida; sin incluir el proceso de reciclaje al final de la vida útil.
- Billeto de papel.- El inventario es desarrollado conforme al sustrato fabricado con base de celulosa. La vida útil de este tipo de billete es tomada como una quinta parte de la del billete de polímero.
- Billeto de algodón.- El inventario es desarrollado conforme al sustrato fabricado con fibra de algodón virgen. La vida útil del billete de algodón es tomada como una quinta parte de la del billete de polímero.
- Billeto de algodón reciclado.- El inventario es desarrollado conforme al sustrato fabricado con fibra de algodón reciclada. La vida útil del billete de algodón es tomada como una quinta parte de la del billete de polímero.

Las categorías de impacto ambiental elegidas fueron: Emisiones de gases efecto invernadero, demanda de energía, liberación de sustancias cancerígenas y metales pesados al ambiente, formación de foto oxidantes y consumo de agua.

Resultados del estudio

El estudio demostró que el ciclo de vida del billete de polímero genera un menor impacto que el generado por el billete de algodón en todas las categorías consideradas, lo cual es debido principalmente a la durabilidad presentada por el polímero.

Mediante el estudio se determinó que la cantidad de agua utilizada para producir el billete de polímero es menor 25% a la utilizada por el billete de papel y de algodón reciclado y 95% en referencia al billete de algodón.

En materia de energía se determinó que debido a que el polímero es derivado del petróleo, la demanda de energía es más alta que la del billete de papel, sin embargo, la mayor durabilidad del billete de polímero origina que esta carga ambiental disminuya y sea equivalente a la producida por el billete de papel. De igual manera, se concluyó que el uso de electricidad en la etapa de fabricación de ambos billetes es muy similar, por lo que el parámetro dominante resulta ser el promedio de vida del billete de polímero, ya que es mayor al del algodón. Por esta razón la carga ambiental en el uso de electricidad disminuye en 75% con el uso del billete de polímero, proporcionándole mejor rendimiento desde la perspectiva ambiental. Se encontró que la disposición final en rellenos sanitarios no contribuye significativamente a la emisión de GEI, sin embargo el impacto en la categoría de calentamiento global se reduce en 75% con el uso del polímero.

La contaminación causada por la producción de billetes se comparó bajo tres parámetros: metales pesados, sustancias cancerígenas y producción de foto oxidantes, debido a que son precursores del smog fotoquímico. Se encontró que el sistema de producción de billetes de polímero es más limpio que la producción del billete de papel con una reducción del 75% en las categorías de metales pesados y sustancias cancerígenas y 40% en la categoría de producción de foto oxidantes (Reserve Bank of Australia, 1998).

A 10 años de que el Banco de la Reserva Australiana comenzó su conversión a billetes de polímero, se ha observado que este sustrato superó las expectativas en muchos aspectos, principalmente en materia de seguridad, debido a que el índice de falsificación se redujo de forma significativa, así como en durabilidad, ya que el polímero superó el tiempo estimado de vida promedio.

Luego de la evaluación de la circulación del billete de polímero, el Banco de la Reserva Australiana concluyó que es más difícil falsificar este tipo de billetes, ya que poseen características altamente complejas, lo cual generaría un elevado costo en el procedimiento de falsificación. Asimismo, es más fácil identificar un ejemplar falso.

Existen aún, muchas más características de seguridad listas para implementarse en cualquier momento, las cuales hasta la fecha no ha sido necesario incorporar.

Se ha eliminado completamente al falsificador “casual” y disminuido en un 75% al falsificador profesional.

A partir del uso del billete de polímero, Australia cuadruplicó la vida útil promedio del billete con respecto a su equivalente en el sustrato de algodón, lo cual reduce los costos de producción. Se comprobó que estos billetes no absorben la humedad, debido a que no presentan porosidad y no alojan suciedad (Tabla 2.5) (Reserve Bank of Australia, 2002).

2.6.2 Banco de Suiza (BNS)

El Banco de Suiza llevó a cabo en el año 1999 un ACV para evaluar el desarrollo y producción de la serie de billetes en circulación, su distribución, destrucción y disposición final, con respecto a sus impactos medioambientales. Los datos utilizados en el análisis fueron obtenidos de la octava edición de billetes suizos (serie 1998), impresos en un sustrato elaborado a base de subproductos provenientes del procesamiento de algodón.

El objetivo del estudio consistió en evaluar el ciclo de vida de los billetes para determinar si generaban alguna problemática desde la perspectiva ecológica y a la salud humana, así como identificar posibles áreas de mejora. Los resultados fueron evaluados respecto a las categorías de efecto invernadero, lluvia ácida y ozono troposférico.

Se analizaron etapas de producción de algodón, producción de sustrato, proceso de fabricación de billetes, distribución, almacenamiento y transporte, así como la generación de residuos y destino al final de la vida útil mediante incineración; excluyéndose la etapa de uso y circulación.

Resultados del estudio

El estudio determinó que el almacenamiento y procesamiento del billete son los factores más significativos en materia de impacto ambiental, generando poco menos de la mitad del total de contaminantes producidos a lo largo de todo el ciclo de vida del billete. El proceso de impresión del billete contribuye a la contaminación en un menor grado. El alto impacto generado por las etapas de almacenamiento y procesamiento se debe principalmente al hecho de que las máquinas de aire acondicionado e iluminación de las habitaciones relacionadas con el proceso de fabricación del billete se encuentran en funcionamiento durante todo el año; tomando en cuenta que cada billete es evaluado y puesto en circulación de cinco a seis veces durante su vida útil. Se determinó también que poco menos de un tercio de la contaminación ambiental causada por la fabricación de billetes es atribuible a la producción de algodón, debido a los plaguicidas que se utilizan para este cultivo.

El Banco de Suiza concluye que el almacenamiento y procesamiento de billetes son las acciones que mayormente causan impacto ambiental, ya que su consumo de energía es relativamente alto; por lo que los billetes suizos no son particularmente críticos para el medio ambiente. De igual manera reportan que el método de disposición al final de la vida útil del billete es de poca importancia desde el punto de vista ecológico.

Se reporta que el impacto por la producción y manejo de algodón corresponde a menos de un tercio del impacto total generado en el ciclo de vida del billete por lo que no se considera significativo.

Se presenta la posibilidad de remplazar el algodón por algún material sintético, sin embargo, se cuenta con poca información sobre el impacto ambiental de otros posibles materiales sintéticos para sustrato (Tabla 2.5) (Swiss National Bank, 1999).

2.6.3 Banco Central Europeo (BCE)

El BCE en el año 2003, desarrolló un ACV con el objetivo de evaluar si se está realizando un uso prudente de los recursos naturales y protegiendo la salud de los ciudadanos durante la fabricación y suministro de billetes.

Se determinó el impacto ambiental de los euros y la posibilidad de mejorar el producto y los procesos involucrados. El uso del billete se comparó con otras dos actividades cotidianas como conducir un coche y encender una bombilla de 60W como se muestra en la Figura 2.16.

El estudio de ciclo de vida de los billetes comprendió desde su fabricación, almacenamiento y circulación, hasta el tratamiento al final de su vida útil.

En la evaluación se utilizaron datos procedentes de los proveedores de la cadena de abastecimiento, datos específicos de las materias primas empleadas y datos de estudio sobre procesos estándar como la producción de electricidad o el transporte obtenidos de la base de datos Ecoinvent 2000. La evaluación se realizó con base en la producción de billetes en el año 2003.

Resultados del estudio

En este estudio se generaron indicadores ambientales para asociar el impacto ambiental generado por el ciclo de vida de los billetes a acciones cotidianas, de esta manera, la evaluación concluyó que el impacto ambiental de los billetes durante su ciclo de vida equivale a que cada ciudadano europeo recorra un kilómetro en automóvil o deje encendida una bombilla de 60 W durante medio día.

Antes de su puesta en circulación en enero del 2002, los billetes europeos fueron examinados en relación con posibles riesgos de toxicidad oral aguda, irritación dérmica y genotoxicidad. Los resultados confirmaron que los billetes no plantean ninguno de los riesgos antes mencionados pues todas las sustancias presentes en la fabricación y uso de los billetes muestran una concentración muy inferior a los límites establecidos en los reglamentos Europeos (Tabla 2.5) (Banco Central Europeo, 2003).

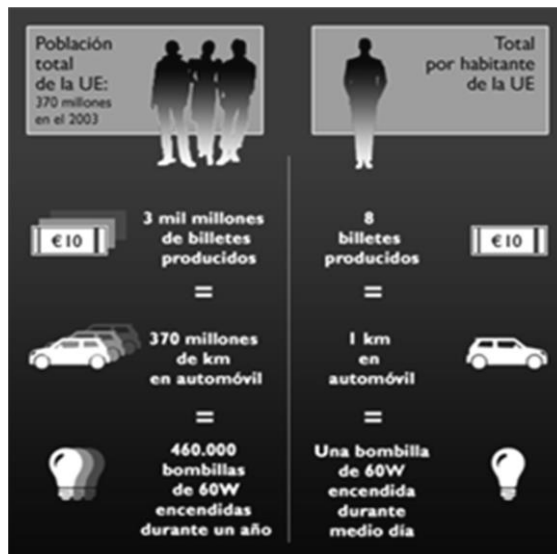


Figura 2.16 Indicadores y resultados del ACV del Banco Central Europeo.

Fuente: (Banco Central Europeo, 2003)

2.6.4 Banco de Canadá

El Banco de Canadá puso en circulación su nueva serie de billetes a partir del 2011 en los cuales el cambio principal consiste en la incorporación del sustrato de polímero en la impresión de sus billetes, así como el innovador diseño. Esta importante decisión trajo consigo el aumento de la durabilidad en la etapa de circulación, una disminución considerable en el índice de falsificación y un menor impacto ambiental generado por el proceso de producción y todo el ciclo de vida del billete.

Para la toma de decisiones en el año 2011 se llevó a cabo un ACV, con el objetivo de evaluar el impacto ambiental de la producción y distribución de los billetes del Banco de Canadá considerando dos sustratos diferentes: el papel a base de algodón frente al sustrato de polímero. Mediante el estudio se buscaba identificar las emisiones de sustancias contaminantes derivadas de la producción del billete y revelar los aspectos de producción y distribución que podrían ser objeto de mejoras.

El estudio examinó el impacto del cultivo de algodón para el billete de fibra de algodón y de la producción de la materia prima para el de polímero, así como la destrucción y eliminación de los billetes desgastados.

Como objetivo se planteó conocer y evaluar la magnitud y la importancia del impacto ambiental potenciales de un producto a lo largo de su ciclo de vida, así como los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar el impacto ambiental de la producción y distribución de billetes canadienses considerando dos sustratos diferentes: papel a base de algodón y polímero.
- La identificación de sustancias riesgosas, ya sea en forma de componentes del billete o como emisiones derivadas de la producción de billetes.
- Revelar los aspectos de la producción y distribución de billetes que podrían ser objeto de reducción de impacto ambiental.
- Obtener un informe del inventario de ciclo de vida para cada etapa, que contenga todos los recursos del consumo y las emisiones, así como identificar las sustancias de preocupación.

El estudio consideró las etapas del ciclo de vida de los billetes incluyendo la producción y transporte de materias primas desde el sitio de producción hasta las instalaciones de la Fábrica de Billetes, la elaboración del sustrato, la impresión de los billetes, el embalaje de materiales relacionados con el producto final, la eliminación de residuos, la distribución, tomando en cuenta el transporte interno en cintas transportadoras, el almacenamiento de billetes en instalaciones del banco y el transporte del producto terminado (Figura 2.17). En la etapa de distribución del billete se incluyó el transporte de billetes del Banco de Canadá a las instituciones financieras y la distribución a sus sucursales, el transporte de billetes de vuelta al Banco. Las etapas posteriores se conformaron por la fase de uso con distribución de billetes a través de cajeros automáticos, así como dos escenarios posibles de trituración y vertido al final de su vida útil. (Bank of Canada, 2011)

Para la etapa de uso se consideró que el único impacto proviene del consumo de energía de los cajeros automáticos (*Automated Teller Machine, ATM*) a través de 7.5 años.

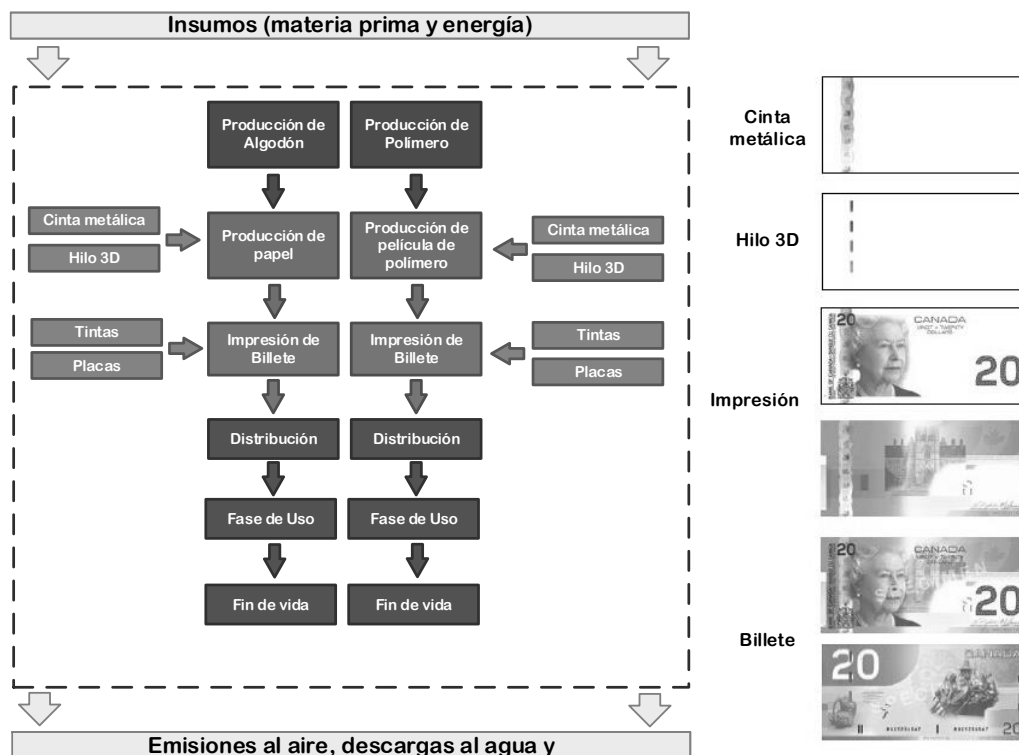


Figura 2.17 Diagrama de bloques del proceso de fabricación de los billetes canadienses.
Fuente: Adaptada de (Bank of Canada, 2011)

La unidad funcional de este estudio se definió como: El suministro de 2.000 dólares (CDN) de valor en efectivo durante un período de tiempo de 7.5 años en billetes de \$20 CDN, la cual se muestra en la Tabla 2.3 (Bank of Canada, 2011).

Tabla 2.3 Unidad funcional utilizada en ACV del Banco de Canadá

Sustrato	Duración (años)	Flujo de referencia
Billete de Algodón	3	250 piezas (2000/20*7.5/3)
Billete de Polímero	7.5	100 piezas (2000/20*7.5/7.5)

Fuente: Adaptada de (Bank of Canada, 2011)

Se seleccionó \$20 CDN en virtud de que es la denominación predominante en circulación y el 95% se distribuyen a través de ATM.

Las categorías de impacto seleccionadas fueron: potencial de calentamiento global, demanda de energía, eutrofización, acidificación, smog fotoquímico, toxicidad humana y deterioro de la capa de ozono. Se utilizaron datos estadísticos en relación al desempeño del billete de 2005-2007. Los datos para la elaboración del ICV se obtuvieron de la producción y distribución del año 2009, se contó con los datos aportados por los proveedores en la cadena de producción del billete y se integró la información proporcionada por la base de datos GaBi 2006. Se utilizó la metodología de cálculo TRACI (herramienta

para la reducción y evaluación de productos químicos y otros impactos ambientales), las categorías de impacto fueron seleccionadas debido a que son parámetros específicos de EE.UU, por lo tanto aplican en gran medida para América del Norte.

Para el desarrollo de ICV se multiplicaron cada uno de los impactos de la producción, distribución y disposición final obtenidos de la información disponible del billete de fibra de algodón por un factor de 2.5 (7.5/3).

Resultados del estudio

Como conclusión, el estudio encontró que los billetes de polímero presentan fuertes ventajas sobre los billetes de papel para todas las fases del ciclo de vida incluyendo la fabricación y la distribución, las cuales de una manera general, consisten en la reducción de al menos 30% del impacto generado en las diversas categorías seleccionadas. Dado que los billetes de polímero presentan una duración al menos 2.5 veces mayor que los billetes de papel de algodón, un menor número de billetes tendrán que ser fabricados y distribuidos durante la vida de la serie.

Respecto a la etapa de fabricación, el billete de polímero genera menor impacto ambiental debido a su duración. Se determinó que el billete de algodón posee una vida útil de 3 años, sin embargo, el billete fabricado en sustrato de polímero presenta una vida de 7.5 años, que ha sido considerado como un parámetro conservador según las estadísticas de otros países. A raíz de esta diferencia de tiempo de vida se puede determinar que el billete de polímero posee un rendimiento 2.5 veces mayor que el de algodón ($7.5/3=2.5$). Por lo tanto, en la distribución el billete de polímero tiene que ser transportado 2.5 veces menos que el de algodón, debido a que se deben distribuir en menor cantidad por el tiempo que duran en circulación, de igual manera se reducen los envíos de billetes no aptos de vuelta al banco central. El peso del billete de polímero es menor, lo que beneficia al medio ambiente a través del tiempo.

La mayoría de los impactos se asocian con la distribución, la cual presenta una contribución entre 20 y 40% y la fase de uso con 30 a 50%; el sustrato de polímero muestra ventajas sobre el de algodón para todas las fases de su ciclo de vida con al menos 30%. Un ejemplo de ello es que se obtuvo que el billete de polímero genera 32% menos impacto que el de fibra de algodón en la categoría de calentamiento global y utiliza un 30% menos de energía. El billete de polímero tendría un mayor impacto en el medio ambiente respecto a algunos indicadores si tuviera la misma vida útil que el papel de algodón; sin embargo, debido a su prolongada duración muestra beneficios ambientales a largo plazo.

Debido a que la mayoría de los impactos del ciclo de vida provienen de la distribución y etapa de uso, la mejora en la cadena de suministro y el uso de energía en cajeros automáticos tendría el beneficio más significativo en la reducción del impacto ambiental de los billetes canadienses (Tabla 2.5) (Bank of Canada, 2011).

2.6.5 Banco de Inglaterra

Durante los últimos años el Banco de Inglaterra ha llevado a cabo un proyecto de investigación sobre los sustratos alternativos para impresión de sus billetes, particularmente relativos al polímero, por lo que en el año 2013 puso en marcha un ACV, con el fin de aumentar la calidad de los billetes en circulación y disminuir el índice de falsificación.

Los objetivos del ACV fueron:

1. Calcular y comparar el impacto ambiental del ciclo de vida de todas las denominaciones de billetes (£5, 10, 20 y 50) impresos en dos tipos de sustrato, e identificar los principales factores de contribución.
2. Identificar sustancias de riesgo y emisiones derivadas del ciclo de vida de los billetes.
3. Identificar los aspectos del ciclo de vida de billetes que podrían ser objeto de reducir el impacto ambiental.

El estudio abarcó la producción de materias primas, la fabricación del billete, embalaje, transporte, distribución mediante cajeros automáticos (ATM), recirculación y retorno al Banco de Inglaterra para la destrucción y tratamiento de los residuos. Se excluyeron factores como la construcción de bienes e infraestructura, los materiales de empaque asociados con la entrega de materias primas, así como la producción y eliminación de las placas de impresión, lo cual representa menos del 1% de la masa que ingresa al proceso de impresión.

Se consideró que la impresión los billetes de polímero no puede llevarse a cabo a la misma velocidad que la impresión en papel. Por lo tanto se estima que esto aumentará el requerimiento de energía en un 10-20 %. Para este estudio se toma un valor intermedio de +15 %.

Actualmente los billetes del Banco de Inglaterra son triturados, compactados y utilizados junto con otros materiales para la fabricación de compost agrícola. Sin embargo, para los billetes de polímero existe una gran variedad de tratamientos potenciales. Para fines de estudio se asumió que los billetes de polímero serían reciclados mediante la generación de energía a partir de los residuos, en una planta diseñada específicamente para esta actividad. El supuesto utilizado en el informe es que los billetes de polímero no aptos serán incinerados con recuperación de energía. Se considera también una alternativa de reciclado, en la cual los billetes pasan por un proceso de clasificación, lavado, granulación y extrusión produciendo un granulado secundario para la obtención de nuevos productos de polímero.

El análisis consideró el efecto de cada etapa del ciclo de vida del billete con base en las siguientes categorías de impacto:

- Potencial de calentamiento global
- Consumo de agua
- Demanda de energía
- Creación de contaminantes dañinos a la capa de ozono
- Índice de toxicidad
- Eutrofización
- Acidificación
- Smog fotoquímico

El estudio examinó el ciclo de vida de los billetes del Banco de Inglaterra, usando como unidad funcional el suministro y uso de £ 1,000 de valor en efectivo durante 10 años, para cada una de las denominaciones, considerando un ciclo de vida promedio de billetes. Cada denominación se evalúa por separado.

Se calculó un periodo de vida útil del billete de polímero utilizando datos de países en los que este tipo de billete ya está en uso. Se consideró un promedio de vida conservador de 2.5 veces el promedio de vida del billete de algodón.

Los flujos de referencia utilizados se muestran en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4 Flujos de referencia utilizados por el Banco de Inglaterra para el ACV billetes

Denominación	Sustrato	Vida promedio (meses)	Flujo de referencia
£5	Papel	24	851
	Polímero	57.6	325
£10	Papel	37.1	286
	Polímero	90.1	117
£20	Papel	113	54.4
	Polímero	285	20.7
£50	Papel	497	5.95
	Polímero	1231	2.13

Fuente: Adaptada de (Bank of England, 2013)

La cantidad de billetes requeridos para lograr la unidad funcional, se determina por:

- La denominación y vida útil del billete
- La velocidad de circulación, la cual determina el número de veces que un billete se clasifica y se vuelve a poner en circulación
- La proporción de los billetes enviados a ATM.

Los datos primarios sobre la fabricación de papel y la impresión se tomaron durante un período de 2 años. Los datos de referencia se obtuvieron a partir del software GaBi (GaBi, 2015) y su base de datos asociada, representativa de los años 2009 a 2011.

Resultados del estudio

Como resultado, el polímero mostró beneficios importantes en todas las etapas de vida del billete. Los billetes de polímero causan menor impacto al ambiente en comparación con los billetes de fibra de algodón. La única categoría en la que el billete de algodón genera un menor impacto ambiental es el deterioro de la

capa de ozono, sin embargo, debido a que el billete de polímero presenta una mayor duración, este impacto se iguala al producido por el billete de algodón.

En relación a los indicadores evaluados, los impactos asociados a la fase de uso superan a los generados en la fase de producción, para ambos sustratos. Por lo tanto, a pesar de que la masa total de billetes de £ 5 es casi tres veces mayor que la masa de £ 10, estos últimos suelen tener mayores impactos en su ciclo de vida debido a su alta velocidad de circulación y a la alta proporción de billetes enviados a ATM. Esto es particularmente notable debido a que los billetes de £ 10 y £ 20 se envían en una proporción muy alta a los cajeros automáticos (91 % y 90 % respectivamente). Por otra parte, los billetes de £ 5 son enviados a ATM en una proporción inferior al 64%, por lo que se concluye que cuanto mayor sea la proporción de billetes enviados a ATM, respecto cada denominación, mayores son los impactos en la fase de uso.

Respecto al análisis de sensibilidad se reportó lo siguiente:

- Los resultados de los análisis de sensibilidad se presentan únicamente para la categoría de potencial de calentamiento global.
- Se realizaron análisis de sensibilidad adicionales para evaluar la influencia en los resultados de las incertidumbres relacionadas con: impactos del cultivo de algodón, las emisiones de compostaje de billetes de papel, el reciclado de billetes de polímero en vez de la incineración con recuperación de energía y la energía consumida en ATM.
- Respecto al billete de £ 50, el reciclaje de polímero mostró notables beneficios en comparación con la incineración con recuperación de energía, sin embargo, esto era menos representativo para otras denominaciones debido a la contribución dominante de los ATM. El cambio en la demanda de electricidad de ATM es de $\pm 20\%$.
- Si se excluye el impacto de los ATM (ya que será el mismo tanto para papel y polímero), la elección de la alternativa al final de la vida útil hace una diferencia notable para los billetes en todas las denominaciones.
- Sin embargo, la influencia del cultivo del algodón y el compostaje de billetes de papel sigue siendo pequeña.

En general se concluye que el billete de polímero posee un promedio de vida útil por lo menos 2.5 veces mayor que el billete de algodón, lo que representa mayor rendimiento ambiental, debido a que las cargas ambientales asociadas con la producción de materia prima y procesamiento de los billetes disminuye significativamente. Los billetes de polímero son más resistentes a la suciedad y la humedad, lo que contribuye a una mayor duración.

Se encontró que los billetes de polímero sólo necesitan tener una vida útil 1.33 veces mayor que la de los billetes de papel para lograr un impacto menor en la categoría de potencial de calentamiento global.

Con base en los resultados obtenidos del ACV y tras un programa de consulta ciudadana el Banco de Inglaterra tomó la decisión de imprimir los nuevos billetes en sustrato de polímero a partir del 2016 (Tabla 2.5) (Bank of England, 2013).

2.6.6 Banco de la Reserva India

El Bharatiya Reserve Bank Note Mudran Private Limited (BRBNMPL) establecido por el Banco de Reserva de India realizó un Análisis de Ciclo de Vida, del cual se cuenta solamente con los siguientes resultados: La huella de carbón causada por billetes a base de algodón podría reducirse en 3.5 veces con la implementación del sustrato de polímero. Los billetes de polímero generan 10.5 veces menos impacto a la salud humana que el generado por el billete de algodón. La sustitución del papel a base de fibra de algodón por el sustrato de polímero puede reducir alrededor de 3.5 veces el consumo de energía producida a través de fuentes no renovables. El análisis indica que el uso de los billetes de polímero es 4.5 veces más eficiente ambientalmente que el sustrato de fibra de algodón (BRBNMPL, 2010).

2.6.7 Otros estudios de viabilidad para el billete de polímero

Para la evaluación de nuevos sustratos que proporcionen un mejor desempeño a los billetes, varios países a nivel internacional han llevado a cabo pruebas de circulación de billetes de polímero obteniendo diversos resultados:

Banco Central de Nueva Zelanda

En el año 1999 el Banco de la Reserva de Nueva Zelanda decidió introducir los billetes de polímero con la finalidad de reducir el riesgo de falsificación, conservar la estructura, limpieza de sus billetes y un fácil manejo mediante máquinas procesadoras. La aceptación de la población y los resultados obtenidos fueron favorables, se presentó un aumento en la durabilidad de los billetes y una reducción en el índice de suciedad, traduciéndose en una disminución de costos; se observó también que la principal causa de deterioro de este sustrato es el desvanecimiento de la tinta tras permanecer un tiempo en circulación (Boaden, 2009).

Banco Central de Rumanía

Rumanía se posiciona como el primer país europeo en adoptar el billete de polímero con la puesta en circulación del billete conmemorativo de 2,000 lei en el año 1999. La aceptación del nuevo billete fue positiva por lo que se tomó la decisión de imprimir la serie completa en sustrato polimérico. Los resultados luego de más de 10 años han sido favorables, el porcentaje de billete no apto disminuyó considerablemente a consecuencia de la alta calidad y durabilidad presentada por este material. Como ventajas se observó una mayor seguridad contra falsificaciones, el aumento de la vida media del billete, un menor índice de suciedad, fácil tratamiento en máquinas procesadoras y la posibilidad de reciclado. Entre los inconvenientes se presentaron alteraciones en la forma y estructura del billete, el deterioro de algunos componentes mecánicos de las máquinas procesadoras debido a la dureza del material plástico y dificultad para identificar mecánicamente algunos de los elementos de seguridad al final de la vida útil (Dumitriu, 2009).

Banco Central de Brasil

El Banco Central do Brasil lanzó al mercado un billete conmemorativo de polímero de 10 Reales en el año 2000, realizando una prueba de circulación durante cuatro años, posteriormente realizó un estudio de viabilidad entre la comunidad y la banca comercial, a partir del cual se concluye que no hay suficiente evidencia de los beneficios del billete de polímero como para decidir cambiar de sustrato, basándose principalmente en las dificultades presentadas en la adaptación de la sociedad al nuevo billete, así como las diferencias presentadas en las operaciones bancarias (Sidney J., 2009).

Banco Central de Vietnam

A raíz del incremento del índice de falsificación, el Banco del Estado de Vietnam comenzó a buscar una solución de seguridad y calidad para sus billetes. Los billetes de polímero de 50,000 y 50,000 dong se pusieron en circulación en el año 2003, tiempo después, para el año 2006 la nueva serie se imprimía completa en sustrato de polímero. Los resultados presentaron una mayor durabilidad, limpieza y calidad con daños estructurales mínimos (Chi Thanh, 2009).

Banco Central de Chile

En el año 2004 el Banco Central de Chile puso en circulación su primer billete de 2,000 pesos impreso en polímero, buscando evaluar su aceptación y comportamiento. Mediante un proceso de evaluación de tres años se determinó que las ventajas presentadas por el billete de polímero superan a las debilidades, acto seguido, se tomó la decisión de imprimir otras dos denominaciones en este material. Entre los elementos favorables se encontró la limpieza y mayor seguridad brindada por el polímero (Montoya, 2009).

Tabla 2.5 Resumen comparativo de los ACV de billetes

	AUSTRALIA	SUIZA	EUROPA	CANADÁ	INGLATERRA
AÑO	1998	1999	2003	2011	2013
OBJETIVO	Identificar y cuantificar el impacto ambiental generado por el billete de polímero en comparación con el de algodón.	Evaluar el desarrollo y producción de los billetes de algodón, con respecto al medio ambiente y salud humana.	<p>Evaluar el uso prudente de los recursos naturales y la protección a la salud de los ciudadanos durante la fabricación y suministro de billetes (sólo algodón).</p> <p>El uso del billete se comparó con otras dos actividades cotidianas como conducir un coche y encender una bombilla de 60W.</p>	<p>Evaluar el impacto ambiental de la producción y distribución de los billetes en función de dos sustratos diferentes.</p> <p>Identificar emisiones y posibles aspectos de mejora.</p>	<p>Calcular y comparar el impacto ambiental del ciclo de vida de todas las denominaciones de billetes impresos en dos tipos de sustrato.</p> <p>Identificar aspectos de mejora.</p>
UNIDAD FUNCIONAL	N/D	N/D	N/D	Suministro de 2000 dólares (CDN) durante un período de tiempo de 7.5 años en billetes de \$20 CND.	Suministro y uso de £ 1,000 durante 10 años, considerando un ciclo de vida promedio de billetes en cada una de sus denominaciones.

	AUSTRALIA	SUIZA	EUROPA	CANADÁ	INGLATERRA
LIMITES DEL SISTEMA	<ul style="list-style-type: none"> -Extracción de materias primas. -Proceso de producción de los billetes. -Etapa de uso, contemplando que el billete de polímero tiene 5 veces más duración que el de algodón. -5 diferentes escenarios variando el método de disposición final y el origen de los materiales. 	<ul style="list-style-type: none"> -Producción de algodón -Proceso de fabricación de billetes -Distribución -Almacenamiento -Transporte -Generación de residuos -Destino final mediante incineración. -Excluyéndose la etapa de uso y circulación 	<ul style="list-style-type: none"> -Fabricación -Almacenamiento -Circulación -Disposición final 	<ul style="list-style-type: none"> -Producción y transporte de materias primas. -Fabricación de sustratos. -Impresión y fabricación de los billetes. -Embalaje de materiales relacionados con el producto final. -Eliminación de residuos. -Distribución. -Transporte de billetes de vuelta al Banco de Canadá. -Fase de uso con distribución de billetes a través de ATM. -Dos escenarios posibles de trituración y vertido al final de su vida útil. 	<ul style="list-style-type: none"> -Producción y transporte de materia prima. -Impresión de billetes. -Distribución de billetes. -Uso de cajeros automáticos (ATM). -Embalaje de material relacionado con el producto final. -Clasificación de billetes no aptos. -Disposición final de los billetes. -Disposición de los residuos de producción. -Se excluyen los materiales de empaque asociados con la entrega de materias primas, productos químicos y otros insumos para los procesos de producción.
INVENTARIO	<ul style="list-style-type: none"> -Todos los insumos -Consumo de energía exceptuando la energía consumida en la etapa de reprocesamiento de los billetes, así como la consumida en fabricación de tintas y placas de grabado. 	<ul style="list-style-type: none"> -Los datos utilizados en el análisis fueron obtenidos de la octava edición de billetes suizos (serie 1998) -Datos proporcionados por los proveedores en la cadena de producción del billete. 	<ul style="list-style-type: none"> -Datos procedentes de los proveedores de cadena de abastecimiento de los billetes. -Datos de estudio sobre procesos estándar como la producción de electricidad o el transporte. 	<ul style="list-style-type: none"> -Los datos primarios se tomaron de la producción de billetes del año 2009. -Se utilizó la base de datos GaBi4 2006 representativa de los años 2005-2010. 	<ul style="list-style-type: none"> -Los datos primarios sobre la fabricación de papel y la impresión se tomaron durante un período de 2 años. -Los datos de referencia se han obtenido a partir de la "Base de Datos de 2012" GaBi, representativos de los años 2009 a 2011.

	AUSTRALIA	SUIZA	EUROPA	CANADÁ	INGLATERRA
CATEGORIAS DE IMPACTO SELECCIONADAS	<ul style="list-style-type: none"> -Emisiones de GEI -Demanda de energía -Liberación de metales pesados al ambiente -Sustancias cancerígenas -Formación de foto oxidantes -Consumo de agua 	<ul style="list-style-type: none"> -Efecto invernadero -Lluvia acida -Ozono troposférico 	<ul style="list-style-type: none"> -Consumo de agua -Consumo de energía -Toxicidad humana 	<ul style="list-style-type: none"> -Potencial de calentamiento global -Eutrofización -Acidificación -Smog fotoquímico -Deterioro de la capa de ozono 	<ul style="list-style-type: none"> -Potencial de calentamiento global -Consumo de agua -Uso de energía -Generación de contaminantes dañinos a la capa de ozono -Índice de toxicidad
RESULTADOS	<p>El ciclo de vida del billete de polímero genera un menor impacto que el de algodón en todas las categorías, debido principalmente a la durabilidad proporcionada por el polímero.</p> <p>La disposición final en rellenos sanitarios no contribuye significativamente a la emisión de GEI. Para la disposición final del polímero, la mejor opción es el reciclado como material para productos de consumo y para el billete de</p>	<p>El almacenamiento y procesamiento del billete son los factores más significativos en materia de impacto ambiental, debido al consumo de energía.</p> <p>La impresión del billete contribuye a la contaminación en un menor grado.</p> <p>Poco menos de 1/3 del impacto causado por la fabricación de billetes es atribuible al algodón.</p> <p>El método de disposición al final es de poca importancia desde el punto de vista ecológico.</p>	<p>El impacto ambiental de los billetes durante su ciclo de vida equivale a que cada ciudadano europeo recorra un kilómetro en automóvil o deje encendida una bombilla de 60 W durante medio día.</p> <p>Los billetes no plantean ningún riesgo para la salud, ya que las sustancias se encuentran presentes en una concentración muy inferior a los límites establecidos.</p>	<p>Los billetes de polímero presentan fuertes ventajas sobre los billetes de papel para todas las fases del ciclo de vida.</p> <p>Se presenta una reducción de al menos 30% del impacto generado en las categorías seleccionadas.</p> <p>La mayoría de los impactos se asocian con la distribución.</p>	<p>Los billetes de polímero ejercen un menor impacto al ambiente.</p> <p>La única categoría en la que el billete de algodón genera un menor impacto ambiental en el deterioro de la capa de ozono, sin embargo, debido a que el billete de polímero presenta una durabilidad mayor, este impacto se iguala.</p> <p>El polímero es más resistente a la humedad y a la suciedad.</p> <p>La mayoría de los impactos se asocian con la distribución.</p>

	AUSTRALIA	SUIZA	EUROPA	CANADÁ	INGLATERRA
	algodón, relleno sanitario o incineración.				
OBSERVACIONES	<p>A 10 años de su circulación, la seguridad y durabilidad proporcionada por los billetes de polímero superó expectativas. Han eliminado alrededor del 75% de sus falsificaciones y la durabilidad cuadruplicó el periodo de vida de los de algodón.</p> <p>Fuente: (Reserve Bank of Australia, 1998)</p>	<p>Fuente: (Swiss National Bank, 1999)</p>	<p>Fuente: (Banco Central Europeo, 2003)</p>	<p>El billete de polímero tendría un mayor impacto en el medio ambiente respecto a algunos indicadores, si tuviera la misma vida útil que el papel de algodón. Debido a su duración, presenta beneficios ambientales a largo plazo.</p> <p>Fuente: (Bank of Canada, 2011)</p>	<p>Con base en los resultados obtenidos del ACV y tras un programa de consulta ciudadana el Banco de Inglaterra tomó la decisión de imprimir los nuevos billetes en sustrato de polímero a partir del 2016.</p> <p>Fuente: (Bank of England, 2013)</p>

Capítulo 3

3. METODOLOGÍA

La Figura 3.1 presenta las etapas metodológicas del Análisis de Ciclo de Vida.

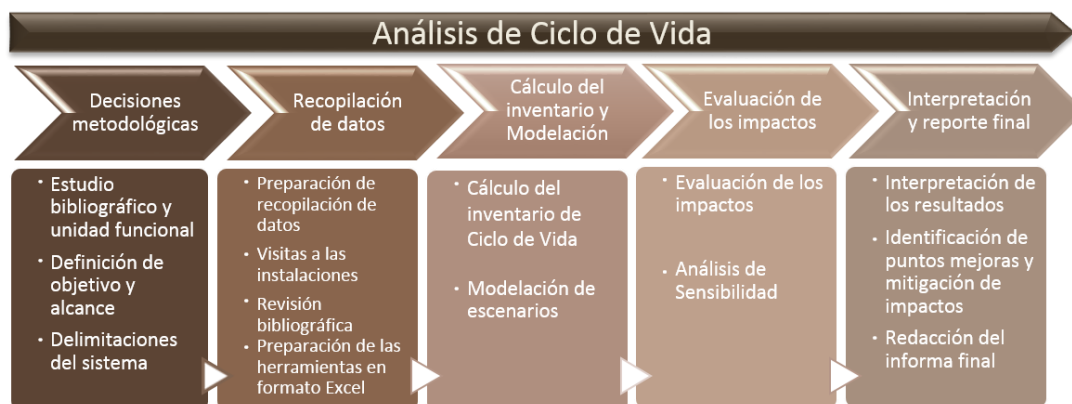


Figura 3.1 Metodología realizada

3.1 Definición de objetivos y alcance

3.1.1 Objetivo de ACV de billetes de México

Evaluar el desempeño ambiental del ciclo de vida del billete de \$200 pesos en función de dos tipos de sustrato: polímero y algodón de alta durabilidad, mediante un ACV comparativo, con la finalidad de identificar los puntos del proceso que generan un mayor impacto ambiental y proponer estrategias de mejora.

3.1.2 Función del sistema

Hacer transacciones comerciales que permitan la adquisición de bienes y servicios, mediante un documento físico de acceso público.

3.2 Límites del sistema

Para los dos tipos de sustrato se considera el ciclo de vida completo, desde la extracción de materias primas, el proceso de fabricación y transporte de las mismas, la fabricación del billete, su distribución a las sucursales de la República Mexicana, la etapa de uso, el regreso al Banco Central para la evaluación de aptitud y la disposición al término de su vida útil, tomando en cuenta todas las entradas y las salidas de cada uno de los procesos unitarios, así como el transporte requerido (Figura 3.2).

Respecto al proceso de producción, se asumen los mismos datos relativos a tintas, planchas, láminas, empaques y contenedores para los dos sustratos.

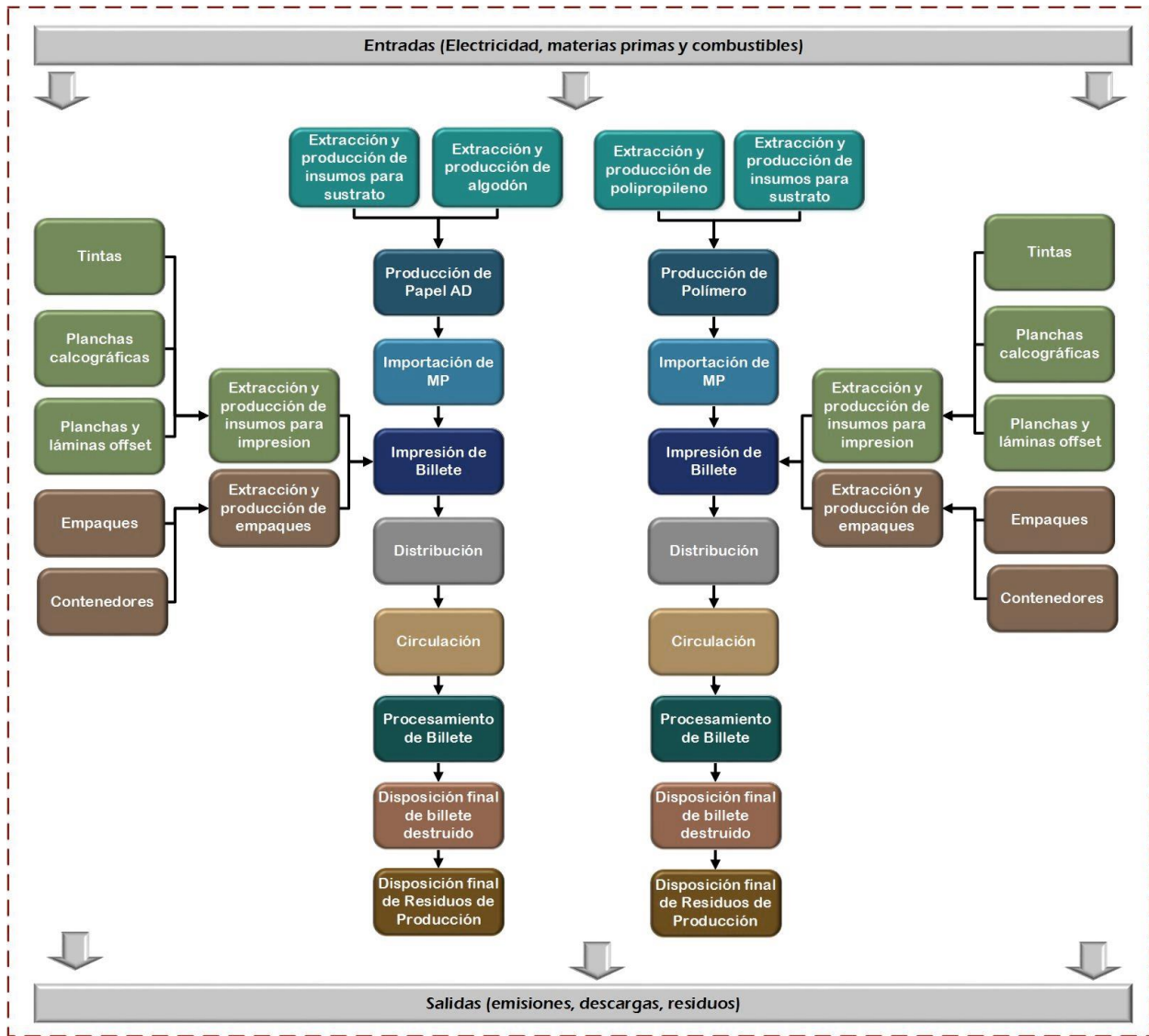


Figura 3.2 Límites del sistema de ACV de billetes de México

En la etapa de uso del billete se ha realizado un análisis de sensibilidad que evalúa el efecto de la inclusión de la energía eléctrica utilizada para distribuir los billetes mediante cajeros automáticos y realizar comparaciones entre los dos escenarios. Este análisis de sensibilidad se presenta en el capítulo 6.

3.2.1 Límites temporales

El año de referencia para los datos utilizados en la elaboración del inventario de ciclo de vida corresponden a la información representativa de la producción de la fábrica del Banco de México durante el año 2013, en virtud de que se considera que los datos son más completos y de mayor calidad.

3.2.2 Límites geográficos

La distribución y uso del billete se delimita para México. Los datos de etapa de impresión se obtienen directamente de la Fábrica de Billetes del Banco de México. Las materias primas para la fabricación de billetes se producen en diferentes partes del mundo, por lo cual la cobertura geográfica varía en función de la ubicación de las plantas de producción de cada uno de los insumos.

3.2.1 Límites tecnológicos

La tecnología utilizada es representativa de la tecnología actual existente para la producción de billetes en México.

La Figura 3.3 ilustra los procesos del ciclo de vida del billete incluidos en el presente estudio.

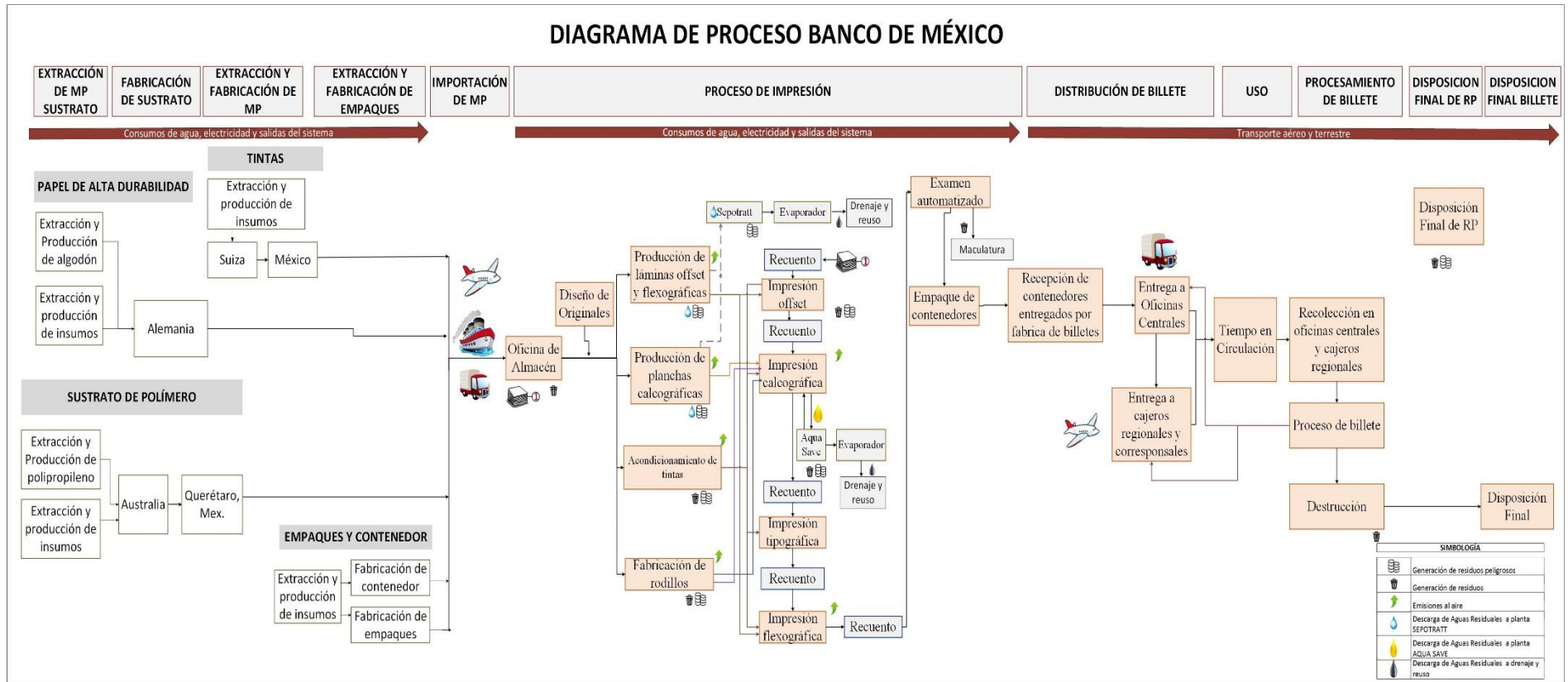


Figura 3.3 Diagrama de proceso Banco de México

3.3 Unidad funcional

La unidad funcional establecida para el ACV de billetes de México es la siguiente: Cantidad de billetes necesaria para mantener en circulación \$12,708 pesos en efectivo en billetes de \$200, durante un periodo de 5 años, en función de 2 tipos de sustrato: polímero y papel de alta durabilidad.

Para la definición de la unidad funcional es necesario un flujo de referencia de piezas de billetes a comparar en un tiempo específico; para esto, se debe tomar en cuenta la denominación del billete analizado, así como la duración del mismo con base en los dos sustratos evaluados (Tabla 3.1).

Por esta razón se desarrolló una ecuación que relaciona los parámetros antes mencionados:

$$\text{Flujo de referencia} = \left(\frac{\text{cantidad (\$)}}{\text{denominación}} \right) \times \left(\frac{\text{periodo de estudio}}{\text{duración del billete}} \right) \quad (1)$$

1. **Flujo de referencia-** Número de piezas de billetes a comparar.
2. **Cantidad (\$)-** Factor numérico que permite definir un monto específico de dinero en efectivo. En este caso se eligió la cantidad de \$12,708 pesos, que de acuerdo con la Encuesta de Ingreso-Gasto de los Hogares (ENIGH, 2012) realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2012), equivale al ingreso promedio en un hogar mexicano mensualmente.
3. **Denominación.-** Corresponde a la denominación del billete que se analizará. En este caso se eligió el billete de \$200 debido a que es la denominación de mayor interés para el estudio por su representatividad en cuestión de producción y demanda de circulación en la fase de uso.
4. **Periodo de estudio.-** Corresponde al tiempo en el cual se analizará el desempeño de los dos productos. Está establecido por el tiempo de vida útil del billete con mayor duración. En este caso, la media de vida útil del billete impreso en sustrato de polímero es de 4.5 años, sin embargo, se ha decidido considerar un periodo de estudio de 5 años.
5. **Duración del billete.-** Tiempo de vida útil del billete en función al tipo de sustrato durante la etapa de uso. Se utilizaron datos estadísticos proporcionados por el Banco de México correspondientes al año 2013, de los cuales se obtuvo que el billete impreso en sustrato de papel AD presenta un tiempo de vida útil de 31.5 meses. Tomando en cuenta que de acuerdo a estudios recientes realizados por el Banco de México, el papel AD presenta una duración de 1.16 veces más que el papel de algodón convencional. De igual manera, los datos estadísticos reflejaron que el billete de polímero posee una duración promedio de 1.7 veces más el tiempo de vida del billete de papel AD o dos veces mayor que el algodón convencional.

Cabe destacar que actualmente el billete con denominación de \$200 se imprime y circula en sustrato de algodón de alta durabilidad, lo cual permitió analizar directamente el tiempo promedio de vida en condiciones reales. Sin embargo, el promedio de vida útil del billete de polímero se estimó con los datos de circulación reales de los billetes de \$20 y \$50 impresos en sustrato de polímero actualmente.

Para analizar la relación entre el impacto ambiental generado y el tiempo de vida útil de los billetes se llevó a cabo un análisis de sensibilidad tomando en cuenta varios escenarios de tiempo de vida. Los resultados de este análisis se presentan en el capítulo 6.

El flujo de referencia se determinó de la siguiente manera. El resultado de las ecuaciones se redondeó al entero más próximo (Tabla 3.1).

$$\text{Flujo de referencia Papel AD} = \left(\frac{\$12,708}{\$200} \right) \times \left(\frac{5 \text{ años}}{2.625 \text{ años}} \right) = 121 \text{ piezas}$$

$$\text{Flujo de referencia polímero} = \left(\frac{\$12,708}{\$200} \right) \times \left(\frac{5 \text{ años}}{4.5 \text{ años}} \right) = 71 \text{ piezas}$$

Tabla 3.1 Unidad funcional de ACV de billetes de México

Sustrato	Duración (meses)	Duración (años)	Flujo de referencia
Billete de papel AD	31.5	2.625	121 piezas
Billete de polímero	54	4.5	71 piezas

3.4 Metodología para la evaluación de impacto

Para la evaluación del Análisis de Ciclo de Vida se utilizó el método ReCiPe v1.08, el cual desarrolla procedimientos orientados a la cuantificación del impacto de ciclo de vida. Los procedimientos de cuantificación de impacto calculan las emisiones de sustancias peligrosas y extracción de recursos naturales para cada categoría de impacto utilizando indicadores específicos (Goedkoop, et al., 2013).

El método se basa en el cálculo de factores de caracterización, los cuales se aplican para convertir los resultados del análisis del inventario a la unidad común de una categoría y son obtenidos mediante modelos de caracterización (ISO, ISO 14000 Environmental Management, 2006).

3.4.1 Elección de categorías de impacto e indicadores

Las categorías de impacto reflejan cuestiones medioambientales de gran importancia, como el agotamiento de recursos fósiles y el consumo de agua. Esto implica, por ejemplo, que los residuos no conforman una categoría de impacto, sin embargo, los efectos ocasionados por estos residuos deben ser analizados por el método y asignados a las categorías correspondientes.

Las categorías de impacto seleccionadas deben corresponder a los problemas de interés internacional y al mismo tiempo dar respuesta a las preocupaciones ambientales de las zonas geográficas donde se

realiza el estudio. Es particularmente importante, que los resultados respondan a las necesidades de la sociedad para que sean de utilidad en el establecimiento de políticas públicas y fomento del desarrollo sostenible.

Es posible que una serie de sistemas de procesos físicos, químicos y biológicos llamados también mecanismos ambientales presenten un alcance global, mientras que otros tienen un alcance regional. Esta diferencia significa que un mecanismo ambiental particular puede tener efectos importantes en una región, pero no en otra, es por esto que el método se basa en el extremo o final del mecanismo ambiental que es llamado punto final. De igual manera, a un punto situado a la mitad del camino o a lo largo del mecanismo ambiental se denomina punto medio. Algunas categorías utilizan indicadores de punto medio, como acidificación y cambio climático, mientras que otras utilizan indicadores de punto final como toxicidad humana y agotamiento de recursos.

Para realizar la cuantificación de impactos ReCiPe considera indicadores de categoría, los cuales son lugares medibles en una vía de impacto. El cálculo de las magnitudes de estos indicadores de categoría requiere un factor de caracterización que a su vez requieren modelos de caracterización.

Los factores de caracterización consisten en un número adimensional que expresa el potencial de daño causado en cada una de las categorías. Por ejemplo, en la categoría de cambio climático se ha introducido como sustancia de referencia el CO₂ en aire, de modo que el factor de caracterización es un número que expresa el daño potencial producido por un kg de GEI en relación con un kg de CO₂ (Goedkoop, et al., 2013).

Para tomar en cuenta el factor de incertidumbre en los modelos de caracterización el método ReCiPe 2008 agrupa diferentes fuentes de incertidumbre y diferentes escenarios o perspectivas de acuerdo a “Teoría Cultural” (Thompson, Ellis, & Wildavsky, 1990).

Se definen tres perspectivas, las cuales agrupan propuestas y supuestos similares:

- Individualista (I): Se basa en el interés a corto plazo (20 años).
- Jerárquica (H): Se basa en los principios más comunes con respecto a marcos de tiempo y otras cuestiones (100 años).
- Igualitaria (E): Se basa en el interés a largo plazo (500 años).

Las categorías de impacto ambiental evaluadas se presentan en la Tabla 3.2. Éstas se seleccionaron de acuerdo a la revisión de la literatura referente a ACV realizados por otros Bancos Centrales (Reserve Bank of Australia, 1998; Bank of Canada, 2011; Bank of England, 2013) así como a los objetivos, al medio geográfico y a las áreas medioambientales de mayor interés para este estudio. Se consideró la ubicación geográfica de la Fábrica de Billetes del Banco de México, ya que se encuentra en una zona industrial cercana a zonas habitacionales y debido a que el proceso productivo genera impactos en diferentes vectores, así como consumo de recursos, se buscó seleccionar las categorías que proporcionaran una perspectiva en todos los ámbitos involucrados, como lo son contaminación al aire, agua y suelo, así como uso de recursos y toxicidad.

Para la evaluación de impacto de este ACV se adoptó un modelo de caracterización de punto medio (efectos intermedios de las intervenciones al ambiente), con una perspectiva jerárquica (ReCiPe Midpoint (H) w/o LT) bajo un enfoque atribucional, el cual consiste en asociar “pesos” al desarrollo y uso del billete en un determinado momento, buscando responder cómo suceden los eventos dentro del estado temporal seleccionado.

Tabla 3.2 Categorías de impacto y factores de caracterización según ReCiPe v1.08

Categoría de impacto	Categoría	Unidad de la categoría de	Factor de caracterización	Iniciales ⁽¹⁾
Cambio climático	CC	kg (CO ₂ al aire)	Potencial de calentamiento global	GWP
Reducción de capa de ozono	DO	kg (CFC-11 al aire)	Potencial de reducción de la capa de ozono	ODP
Toxicidad humana	TH	kg (1,4-DB al aire urbano)	Potencial de toxicidad humana	HTP
Formación de oxidantes	FOF	kg (COVNM al aire)	Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos	POFP
Acidificación terrestre	AT	kg (SO ₂ al aire)	Potencial de acidificación terrestre	TAP
Eutrofización de agua dulce	EAD	kg (P al agua dulce)	Potencial de eutrofización de agua dulce	FEP
Ecotoxicidad terrestre	ECOT	kg (1,4-DB al suelo industrial)	Potencial de ecotoxicidad terrestre	TETP
Ocupación de suelo agrícola	OSA	m ² a (tierra agrícola por año)	Potencial de ocupación de tierras agrícolas	ALOP
Agotamiento de agua	AA	m ³ (agua)	Potencial de agotamiento de agua	WDP
Agotamiento de recursos minerales	AM	kg (Fe)	Potencial de agotamiento de recurso mineral	MDP
Agotamiento de combustibles fósiles	AF	kg (Petróleo crudo)	Potencial de agotamiento del combustible fósil	FDP

⁽¹⁾Del nombre original en inglés (Goedkoop, et al., 2013)

3.4.1.1 Categorías de impacto a nivel de punto medio

Estas categorías evalúan la magnitud del impacto generado de manera directa a un mecanismo ambiental, sin tomar en cuenta las repercusiones que esto pueda ocasionar a la salud humana o al ecosistema. Por ejemplo, en la categoría de cambio climático el impacto de punto medio se determina cuantificando el potencial de calentamiento global que una emisión de contaminantes pueda generar en el entorno mediante el uso de un factor de caracterización. Sin embargo, no analiza las consecuencias que esta emisión pueda generar en la salud humana y en el ecosistema después de un tiempo determinado acorde a la perspectiva seleccionada (Goedkoop, et al., 2013).

Para la caracterización de impactos a nivel punto medio se define la siguiente expresión:

$$I_m = \sum_i Q_{mi} m_i \quad (2)$$

Donde m_i es la magnitud de la intervención i , Q_{mi} el factor de caracterización que conecta la intervención i con la categoría de impacto de punto medio m e I_m el indicador resultante para la categoría de impacto de punto medio m .

3.4.1.2 Categorías de impacto a nivel de punto final

Las categorías de impacto a nivel de punto final analizan los daños que se generan a los componentes finales del mecanismo ambiental; por ejemplo el impacto que el cambio climático presenta tanto en los seres humanos como en la biodiversidad y el ecosistema en general.

Existen dos procedimientos de caracterización de los impactos a nivel de punto final, el primero es sin la intervención de los cálculos de punto medio y la fórmula es:

$$I_e = \sum_i Q_{ei} m_i \quad (3)$$

Donde m_i es la magnitud de la intervención i , Q_{ei} el factor de caracterización que conecta la intervención i con la categoría de impacto de punto final e y por otra parte I_e es el indicador resultante para la categoría de impacto de punto final e .

El segundo procedimiento para caracterizar los impactos a nivel de punto final es partiendo del cálculo de puntos intermedios:

$$I_e = \sum_m Q_{em} I_m \quad (4)$$

Donde I_m es el resultado del indicador de punto medio en la categoría de impacto m , Q_{em} es el factor de caracterización que conecta la categoría de impacto m a nivel punto medio con la categoría de impacto e a nivel punto final. I_e es el indicador resultante para la categoría de impacto de punto final e .

Las categorías de impacto a nivel de punto final analizan tres áreas de protección: daños a la salud humana, ecosistemas y recursos. Cada uno de estos apartados requiere un modelo de caracterización que permita la cuantificación de impactos, como se presenta a continuación (Goedkoop, et al., 2013).

3.4.1.3 Daños a la salud humana

Dentro de la categoría de daños a la salud se implementa un modelo de caracterización llamado DALY (disability-adjusted life years), el cual es utilizado para cuantificar el daño ocasionado a la salud humana. Se basa en las estadísticas de los años perdidos debido a incapacidades derivadas de una amplia gama de enfermedades, incluyendo varios tipos de cáncer y enfermedades no transmisibles.

Cuando se aplica una misma ponderación a la importancia de un año de vida perdido a cualquier edad, DALY es la suma de los años perdidos (YLL) y los años de incapacidad (YLD).

$$DALY = YLL + YLD \quad (5)$$

$$YLD = w * D \quad (6)$$

Donde D es la duración de la enfermedad y w es un factor de gravedad que toma valores de 0 a 1, donde 0 se asigna a un estado de salud completa y 1 a casos de defunción.

Por lo tanto, la aplicación de un promedio mundial de DALY estima el cálculo de los factores de caracterización e implica la asunción de los daños ocasionados a la salud humana debido a emisiones realizadas dentro del ciclo de vida. Para ACV se estudian casos enfocados en regiones específicas de impactos a la salud humana (Goedkoop, y otros, 2013).

3.4.1.4 Ecosistemas

Esta categoría tiene como finalidad cuantificar el daño ejercido a un ecosistema tomando en cuenta todos sus componentes. El método consiste en describir la calidad del ecosistema en términos de energía, materia y especies, posteriormente se eligen las especies que se pueden utilizar como grupos representativos de la calidad total de un ecosistema, para lo cual se modela la pérdida de especies durante cierto tiempo. Los daños se evalúan respecto a factores como extinción total reversible o irreversible de las especies en un área definida y un periodo determinado, mediante la suma de la fracción de desaparición por la densidad de especies (Goedkoop, y otros, 2013).

$$CF_{ED} = PDF_{terr} * SD_{terr} + PDF_{fw} * SD_{fw} + PDF_{mw} * SD_{mw} \quad (7)$$

CF_{ED} = Factor de caracterización por daño al ecosistema

PDF_{terr} = (Facción de desaparición de especies terrestres) factor de caracterización en PDF.m².año

SD_{terr} = Factor de densidad de especies terrestres (especies/m²)

PDF_{fw} = (Facción de desaparición de especies de agua dulce) factor de caracterización en PDF.m³.año

SD_{fw} = Factor de densidad de especies de agua dulce (especies/m³)

PDF_{mw} = (Facción de desaparición de especies marinas) factor de caracterización en PDF.m³.año

SD_{mw} = Factor de densidad de especies marinas (especies/m³)

3.4.1.5 Recursos

El método se basa en la distribución geológica de recursos minerales y fósiles para evaluar cómo el uso de estos recursos provoca cambios en los esfuerzos requeridos para extraer recursos futuros con base en costos de extracción. La evaluación de recursos se clasifica en tres categorías: bióticos, abióticos y suelo.

El aumento del costo marginal (MCI) es el factor que representa el aumento del costo de una mercancía r (US\$ /kg), debido a una extracción o rendimiento (kg) del recurso r . MCI se expresa en dólares por kilogramo cuadrado durante el año 2000 (US\$ / kg²).

$$MCl_r = \frac{\Delta Cost_r}{\Delta Yield_r} \quad (8)$$

Por lo tanto, el aumento de los costos, expresado en dólares por kilogramo (\$/kg), se debe multiplicar por un factor que expresa la cantidad consumida. Este paso convierte la extracción de un recurso en un aumento de costos para la sociedad en general.

El valor actual para la sociedad por extracción de recursos se calcula sumando el aumento del costo marginal para cada t años en el futuro, multiplicado por el importe de consumo anual ($P_{r,t}$ en kg/año) dividido entre el aumento de los costos por la tasa de descuento. La práctica internacional recomienda tasas de descuento que varían entre 1 y 15% (Goedkoop, et al., 2013).

$$PVC_r = \sum_T \frac{P_{r,t} * MCl_r}{(1 \mp d)^t} \quad (9)$$

3.4.2 Modelos de caracterización

Para cada categoría de impacto ReCiPe recurre a modelos de caracterización que permiten calcular un factor de caracterización para convertir el resultado del análisis del inventario de ciclo de vida a la unidad común del indicador de categoría. A continuación se presentan los modelos utilizados en cada categoría de impacto (Goedkoop, et al., 2013).

3.4.2.1 Cambio climático

Esta categoría de impacto se define como el potencial de incremento en la temperatura de la superficie de la Tierra que se da por el aumento de la concentración de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), la cual es conocida generalmente como "calentamiento global". Sin embargo, es conveniente llamarla "cambio climático" ya que otros eventos como las tormentas o el enfriamiento regional pueden ser parte de sus impactos (IPCC, 2013).

El índice para evaluar y agregar las intervenciones en la categoría de cambio climático es el Potencial de Calentamiento Global (GWP) y está basado en las propiedades radiativas de los GEI (por ejemplo, la absorción de la radiación del calor). El GWP es la medición de la fuerza radiativa de un GEI que se encuentra en la atmósfera, integrado en un horizonte temporal definido en relación con el del dióxido de carbono (CO₂). El GWP representa el efecto combinado de los diferentes tiempos que estos gases permanecen en la atmósfera y su eficacia relativa es la causa de forzamiento radiativo, generando que la temperatura superficial de la Tierra aumente.

El indicador de gases efecto invernadero se deriva de la habilidad para reflejar el calor y la permanencia del gas en la atmósfera. Estas propiedades se comparan con las propiedades del dióxido de carbono y

son convertidas en CO₂ eq, lo cual permite sumar los equivalentes de cada gas para obtener un indicador de GEI.

Para la categoría de cambio climático se utilizan los factores de equivalencia de CO₂ publicados por el IPCC (2007). El factor de equivalencia depende del periodo de tiempo considerado. Si una sustancia presenta un tiempo de vida comparable al CO₂, el factor de equivalencia es relativamente insensible al tiempo, sin embargo, para sustancias que presentan un tiempo de vida media significativamente mayor o menor, los factores de equivalencia varían representativamente. Para todas las sustancias, excepto CO₂, el tiempo de vida se determina por la química atmosférica y por la efectividad de sumideros de carbono (De Schryver, et al., 2013).

El factor de equivalencia para la categoría de cambio climático se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$GWP_{x,T} = \frac{\int_0^T a_x * [x(t)]dt}{\int_0^T a_r * [r(t)]dt} \quad (10)$$

Donde GWP_x , representa el potencial de calentamiento global de la sustancia x , T es el tiempo considerado para realizar el cálculo, a_x es la eficiencia de radiación debido al aumento de una unidad de la sustancia en la atmósfera. El potencial de radiación directo en ppbv (partes por billón, volumen base) se derivan de modelos de transferencia radiativa infrarroja basados en mediciones de laboratorio de las propiedades moleculares de cada sustancia, tomando en cuenta sus pesos moleculares.

En la Tabla 3.3 se presentan los principales compuestos que contribuyen al calentamiento global, con el tiempo de permanencia en el ambiente, su eficacia radiativa y su efecto con respecto al CO₂, según IPCC (2007).

Tabla 3.3 Potenciales de Calentamiento Global relacionados con el CO₂

Nombre	Formula química	Tiempo de vida (años)	Eficacia radiativa (W m ⁻² ppb ⁻¹)	Potencial de calentamiento global 100 años
Dióxido de carbono	CO ₂	ver abajo ^a	^b 1.4E-05	1
Metano	CH ₄	12 ^c	3.70E-04	21
Óxido nitroso	N ₂ O	114	3.03E-03	310
<i>Principales sustancias controladas por el Protocolo de Montreal</i>				
CFC-11	CCl ₃ F	45	0.25	3800
Halon-1301	CBrF ₃	65	0.30	5400
Tetracloruro de carbón	CCl ₄	26	0.13	1400
Bromuro de metilo	CH ₃ Br	0.7	0.01	5
Cloroformo de metilo	CH ₃ CCl ₃	5	0.06	146
HCFC-22	CHClF ₂	12	0.20	1500
HFC-23	CHF ₃	270	0.19	11700
<i>Hidrocarburos y otros compuestos- Efectos directos</i>				
Dimetilo de éter	CH ₃ OCH ₃	0.015	0.02	1
Cloruro de metileno	CH ₂ Cl ₂	0.38	0.03	31
Cloruro de metilo	CH ₃ Cl	1	0.01	45

Fuente: Adaptada de (IPCC, 2007)

^a La función de la respuesta del CO₂ utilizada en esta tabla se basa en la versión revisada del modelo del ciclo de carbono de Bern utilizando una concentración de CO₂ con un valor de 378 ppm. El deterioro de un pulso de CO₂ con el tiempo está dado por:

$$a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i * e^{-t/\tau_i}$$

donde $a_0= 0,217$, $a_1= 0,259$, $a_2= 0,338$, $a_3= 0,186$, $t_1= 172,9$ años, $t_2= 18,51$ años, y $t_3= 1.186$ años, para $t < 1.000$ años.

^b La eficiencia radiativa del CO₂ se calcula utilizando la expresión simplificada del IPCC (1990), con un valor de concentración actualizado de 378 ppm y una perturbación de +1 ppm.

^c El tiempo de perturbación del CH₄ es de 12 años. El PCM del CH₄ incluye efectos indirectos de mejoras de ozono y vapor de agua en la estratósfera.

De igual manera se considera el efecto de la temperatura mediante el tiempo de residencia del CO₂, así como los daños a la salud y a los ecosistemas.

La relación entre la liberación de una emisión de CO₂ y el efecto de la temperatura se puede describir de la siguiente manera:

$$TF = LT_{CO_2} * \frac{\Delta TEMP_t}{\sum_t E_{CO_2}} \quad (11)$$

Donde TF es el factor de temperatura por 1kg de CO₂ (°C.año.kg⁻¹), LT_{CO_2} el tiempo de vida del CO₂ (años), $\Delta TEMP_t$ el cambio de temperatura media entre la situación en el año 2000 y la situación en el año t (°C), así como E se refiere a la masa anual del CO₂ (kg/año). La primera parte del factor temperatura es el tiempo de vida del CO₂, el cual no está determinado por los procesos químicos atmosféricos sino por la eficacia de los sumideros de carbono, los cuales a su vez dependen del nivel de emisión. El IPCC 2001 especifica un estimado de vida de CO₂ de 150 años.

La segunda parte del factor de temperatura es el cambio de temperatura causado por una cierta emisión durante cierto tiempo. El cambio de temperatura entre la situación del año 2000 y la situación en el año t , se puede calcular de la siguiente manera (Meinshausen, 2005).

$$\Delta TEMP_t = c * \sum_t E_{CO_2} \quad (12)$$

Como resultado, la relación entre la emisión de CO₂ y el cambio de temperatura depende de la sensibilidad de la mitigación del CO₂. La segunda parte del factor de temperatura se puede escribir como:

$$\frac{\Delta TEMP_t}{\sum_t E} = \frac{c * \sum_t E_{CO_2}}{\sum_t E_{CO_2}} = c \quad (13)$$

El factor de temperatura para el CO₂ se puede calcular con base en las ecuaciones anteriores de la siguiente manera:

$$TF = 7.09 \times 10^{-6} * 150 = 1.064 \times 10^{-13} \text{ } ^\circ\text{C. año. kg}^{-1} \quad (14)$$

Una ventaja de este método es que los factores de temperatura se obtienen consistentemente para todos los gases de efecto invernadero, es decir, utilizando el tiempo completo de vida atmosférica, mientras que el enfoque basado en el pulso deriva factores de temperatura con el tiempo de vida del CO₂, pero utilizando el GWP100 para todos los demás gases de efecto invernadero.

El cambio climático tiene diversos efectos en la salud humana, algunos actúan de manera directa como las olas de calor y la contaminación del aire. La frecuencia e intensidad de los efectos depende de la región y del tiempo (De Schryver, et al., 2013).

El factor de daño a la salud por efectos del cambio climático se determina mediante la relación de los cambios en la temperatura y la variación en el DALY. Este factor se determina por medio de la siguiente expresión:

$$DF_{HH} = \frac{\Delta Att. B_{tot}}{\Delta T} \quad (15)$$

Donde DF_{HH} es el factor de daño en salud (DALY/año.°C), ΔT la diferencia de temperatura entre el escenario base (1990) y el escenario 2030 y $\Delta Att. B_{tot}$ el incremento de la propensión de una población a contraer una enfermedad, según el escenario elegido para el 2030.

La propensión atribuible se puede definir como:

$$Att. B_{r,h} = (RR_{r,h} - 1) * BoD_{r,h} \quad (16)$$

Con la carga $Att. B_{r,h}$ atribuible a una región r por daños a la salud h , durante un año, el riesgo relativo RR para un escenario BoD se puede determinar de la siguiente manera:

$$Att. B_{tot} = \sum Att. B_{r,h} \quad (17)$$

Donde $Att. B_{tot}$ representa la carga atribuible global en daños a la salud debido a una elevación de temperatura.

Los factores de riesgo relativo (RR) dependen del escenario de emisiones y de temperatura elegido. Los factores RR provienen del informe de la Organización Mundial de la Salud “Cambio climático y la salud humana” (McMichael, et al., 2003). El método ReCiPe considera seis regiones diferentes en el mundo y cinco efectos a la salud; dado que el cambio climático es de impacto global se consideran los riesgos para cada región en específico. Los DALY’s para el periodo de referencia 1990 se derivan del reporte (Murray & Lopez, 1996).

En materia de ecosistema, existen varios factores que vinculan el cambio climático con la pérdida de especies principalmente el aumento de temperatura y el impacto en las condiciones meteorológicas.

El factor de daño en los ecosistemas debido al cambio climático se deriva de la relación existente entre el aumento de la temperatura y los cambios en la fracción de disminución de especies y se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$DF_{ES} = \frac{\Delta PDF * area * SD_{terr}}{\Delta T} \quad (18)$$

Donde DF_{ES} es el factor de daño a los ecosistemas (1/°C), ΔPDF el cambio en el potencial de la disminución en la fracción de especies en el área terrestre mundial, exceptuando las áreas en las cuales

no se presenta la existencia de especie alguna y SD_{terr} la densidad de especies. La extensión se reporta para diferentes temperaturas y regiones (De Schryver, Brakkee, Goedkoop, & Huijbregts, 2013).

El factor de caracterización para la categoría de cambio climático referente al daño a ecosistemas (año/kg CO₂) se calcula a partir del factor de temperatura y el factor de daño, mediante la siguiente ecuación:

$$CF_{ES} = TF * DF_{ES} \quad (19)$$

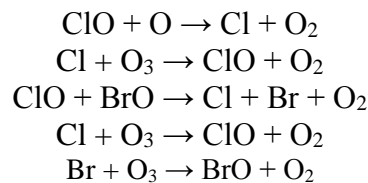
En donde TF es el factor de temperatura (°C.año/kg CO₂) y DF el factor de daño (1/°C).

3.4.2.2 Reducción de capa de ozono

El ozono estratosférico, forma la capa de ozono, el cual actúa como un filtro natural que protege de los rayos ultravioleta dañinos emitidos por el Sol (radiación UV-B). El ozono estratosférico se forma y se destruye continuamente por la acción de la luz solar y las reacciones químicas en la estratósfera, si esta radiación no es absorbida por la capa de ozono, llega a la superficie de la Tierra donde puede aumentar el riesgo de cáncer de piel, cataratas y debilitamiento del sistema inmunológico. Además, puede dañar la flora terrestre y los ecosistemas acuáticos.

El agotamiento de la capa de ozono se produce si la tasa de destrucción de ozono se incrementa a causa de las emisiones al aire de sustancias que agotan el ozono (SAO), las cuales tienen átomos de cloro o bromo y están contenidas en los clorofluorocarbonos (CFC), así como en los halones presentes en sustancia como gases refrigerantes, solventes y aerosoles.

El factor de caracterización para el agotamiento de la capa de ozono representa la destrucción de la capa de ozono en la estratósfera a causa de las emisiones de origen antropológico. Estos son productos químicos recalcitrantes que contienen átomos de Cl y Br, los cuales poseen una larga vida atmosférica y que reaccionan en la atmósfera formando clorofluorocarbonos (CFC) y liberando Cl y Br. Estas reacciones generan una acelerada degradación de la capa de ozono.



El potencial de agotamiento de ozono (ODP) se ha definido como la medida relativa de la capacidad de agotamiento del ozono y utiliza CFC-11 como referencia. ReCiPe 2008, se enfoca solo a los daños causados a la salud humana debido a la incertidumbre con respecto a otras áreas de protección. Para la caracterización de los daños, se toman en cuenta factores de protección, como el color de la piel y hábitos culturales, como la ropa (Van Dijk, Van Wijnen, Chaplin, & Slaper, 2007).

Existen siete grupos considerados como agotadores de ozono: CH₃Cl cloruro de metilo, CFCs clorofluorocarbonos, HCFCs/HBFCs hidrocloreofluorocarbonos/hidrobromofluorocarbonos, CCl₄ tetracloruro de carbono, CH₃Br bromuro de metilo, CH₃CCl₃ metilcloroformo, clorofluorocarbonos bromados.

La exposición a la radiación UV se calcula tomando en cuenta la altitud de una zona a la que habita la población expuesta, así como las características demográficas y color de piel. Para el modelo de caracterización se incluye un factor de protección universal para todos los tipos de cáncer de piel. Lo anterior resulta en una relación para el factor de protección como función del tipo de piel.

$$f_{prot} = 10^{-0.0321(SkinRefl-66)} \quad (20)$$

El factor de equivalencia en este modelo es el Potencial de Agotamiento del Ozono (*ODP*), el cual es una medida relativa para determinar el potencial que una sustancia presenta para destruir la capa de ozono, comprende el tiempo de residencia atmosférica y el agotamiento de ozono estratosférico y se puede calcular por medio de la siguiente ecuación.

$$\Delta OD_j = \sum_{i \in j} \Delta m_i * ODP_i(\infty) \quad (21)$$

El modelo de caracterización determina la relación entre el daño a la salud y la desviación de los rayos UV, en el caso de las cataratas la relación es más certera que en el caso del cáncer de piel. La adecuada evaluación del daño a la salud requiere una relación dosis-respuesta. La supresión del sistema inmunológico no se incluye debido a la escasez de datos. Tanto para la aparición de cáncer de piel como de cataratas el aumento es evidente para grupos de 40-49 años de edad (Van Zelm, et al., 2007).

3.4.2.3 *Formación de oxidantes fotoquímicos*

El punto de caracterización asociado con la formación de oxidantes fotoquímicos es la formación de moléculas de ozono troposférico. El ozono (O_3) es un gas oxidante reactivo, producido naturalmente en pequeñas cantidades en la atmósfera terrestre, sin embargo, en la tropósfera provoca efectos perjudiciales a la salud humana, los ecosistemas y la agricultura ya que según las concentraciones presentes puede producir daños a la vías altas del sistema respiratorio de los seres humanos y especies animales superiores, reducción de la fotosíntesis y aumento en la senescencia en vegetales, es decir una muerte celular programada aumentada de los vegetales. Las tasas de formación de ozono en la tropósfera están regidas por las reacciones químicas complejas influenciadas por las concentraciones ambientales de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), así como la particular mezcla de COV, la temperatura, la luz solar y los flujos convectivos. El monóxido de carbono (CO) y el metano (CH_4) pueden desempeñar también un papel en la formación de ozono.

3.4.2.4 *Acidificación terrestre*

La deposición atmosférica de sustancias inorgánicas, como los sulfatos, nitratos y fosfatos, causa un cambio en la acidez del suelo, dañando a los organismos vivos y su entorno. Para casi todas las especies de plantas existe un pH ácido óptimo, la desviación grave de este nivel es perjudicial a estas especies y se le conoce como acidificación, lo que causa cambios en la presencia de especies. Existen emisiones ácidas generadas por el hombre y otras generadas a partir de reacciones atmosféricas, las cuales pueden ser depositadas en la superficie terrestre tras el paso del tiempo. Las principales emisiones acidificantes son óxidos de nitrógeno, amoníaco y dióxido de azufre. El potencial de acidificación terrestre se expresa en dióxido de azufre equivalente (SO_2 eq).

Las principales emisiones acidificantes son NO_x, NH₃ y SO₂ (Udo de Haes, et al., 2002) (Hayashi, Okazaki, Itsubo, & Inaba, 2004). La persistencia de una sustancia acidificante en el sistema puede ser calculada mediante un modelo de deposición atmosférica combinado con un modelo de dinámica de suelos mientras que los efectos ocasionados a un ecosistema por una sustancia acidificante se pueden determinar con una curva dosis-respuesta de la disminución de especies.

En la categoría de acidificación se emplea el modelo de Base de Saturación (BS) como indicador para expresar acidez. BS es el grado en el que la adsorción de un suelo está saturada con cationes básicos, distintos al hidrógeno y aluminio. BS se define como la suma de cationes básicos (BCeq/kg suelo), dividida entre la capacidad de intercambio catiónico del suelo (CECeq/ kg suelo), multiplicado por 100:

$$BS = \frac{BC}{CEC} = \frac{[K] + [Ca] + [Mg] + [Na]}{[H] + [K] + [Ca] + [Mg] + [Na]} \quad (22)$$

A mayor BS, mayor cantidad de cationes básicos presentes en el suelo, lo cual mejora la capacidad reguladora para los equivalentes ácidos (De Vries, et al., 2002).

El factor de caracterización a nivel punto final para una sustancia acidificante x (CF_x en años.kg⁻¹) por una superficie forestal j (A_j en m²) y el promedio de la densidad de especies terrestres SD_{terr} (especies/m²) se calcula con la siguiente ecuación:

$$CF_x = \frac{d \text{ especies}}{dM_x} = SD_{terr} * \sum_j A_j * \frac{dDEP_j}{dM_x} * \frac{dBS_j}{dDEP_j} * \frac{dPDF}{dBS_j} \quad (23)$$

A nivel punto medio el potencial de acidificación terrestre se expresa en SO₂-equivalentes y por lo tanto el área es independiente. El cálculo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$TAP = \frac{FF_x}{FF_{SO_2}} \quad (24)$$

Donde el factor de acidificación a nivel punto medio (FF_x) se obtiene de la siguiente manera:

$$FF_x = \frac{\sum_j (\Delta BS_j * A_j)}{\Delta M_x} \quad (25)$$

3.4.2.5 Toxicidad humana

La toxicidad es la habilidad inherente de algunos químicos de causar daños sistémicos a los organismos vivos o a los ecosistemas; no es un término absoluto y fácil de definir, ya que depende de factores como la concentración, condiciones del receptor, tipo y tiempo de exposición, además de la metodología empleada para realizar la traducción de los datos empíricos de laboratorio a efectos ambientales potenciales. Los conceptos más importantes para caracterizar la ecotoxicidad son el destino, exposición y efectos asociados de las sustancias (INE, 2009).

La identificación de los impactos implica utilizar 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 o aire y a partir de esto estimar un índice de impacto, que se relaciona al de la sustancia de referencia 1,4- diclorobenceno/kg de emisión (INE, 2009).

La toxicidad incluye los efectos de las sustancias tóxicas presentes en el ambiente sobre los seres humanos, así como los ecosistemas acuáticos y terrestres. Afecta a las áreas de protección de la salud humana, entorno natural y recursos naturales.

El factor de caracterización de la toxicidad humana y la ecotoxicidad está asociada con el tiempo de persistencia y acumulación en la cadena alimenticia humana (exposición) así como también con la toxicidad o efectos de las sustancias. Los factores de persistencia y exposición pueden ser calculados mediante un modelo de evaluación, mientras los efectos pueden ser derivados de los datos de toxicidad obtenidos de forma experimental en seres humanos y animales (Hertwich, Pease, & McKone, 1998).

El modelo de caracterización utilizado en esta categoría se denomina USES-LCA por sus siglas en inglés (the Uniform System for the Evaluation of Substances adapted for LCA purposes).

La variación en estado estacionario de la concentración en un entorno ambiental debido a la emisión se define como el factor de persistencia específica para el entorno y se determina de la siguiente manera (Huijbregts, Rombouts, Ragas, & Van de Meent, 2005):

$$F_{j,i,x} = \frac{\partial C_{j,x}}{\partial M_{i,x}} \quad (26)$$

Donde $F_{i,x,g}$ representa la fracción de consumo de población humana en una escala geográfica (g), incluyendo el transporte de una sustancia x a través de la ruta de consumo r (kg.dia^{-1}) en una escala g .

Como sustancia de referencia se utiliza el 1,4 diclorobenceno en los cálculos referentes a toxicidad humana, agua dulce, ecotoxicidad marina e industrial y ecotoxicidad terrestre.

A nivel de punto final, el daño causado a la población humana por una serie de enfermedades expresado en $DALY_{ov}$ puede estimarse de la siguiente manera:

$$DALY_{ov} = N_{pop} * \sum_e DALY_e * R_e \quad (27)$$

Donde $DALY_{ov}$ es una medida de daño general a la población humana, N_{pop} corresponde a la población expuesta, $DALY_e$ es el DALY por enfermedad de tipo e y R_e es la probabilidad de ocurrencia de enfermedad tipo e en la población humana.

$DALY_e$ es la suma de los años de vida perdidos (YLL_e) y los años de incapacidad (YLD_e) a causa de una enfermedad tipo e . El método incluye 49 tipos de enfermedades.

$$DALY_e = YLL_e + YLD_e \quad (28)$$

El factor de caracterización humana para una sustancia x emitida se relaciona con el factor de persistencia y el factor de daño:

$$CF_{r,i,x,g,c/nc} = F_{r,i,x,g} * E_{r,x,c/nc} \quad (29)$$

Donde $CF_{r,i,x,g,c/nc}$ representa el factor de caracterización humano para efectos cancerígenos y no cancerígenos en una escala g que representa el transporte de una sustancia x a través de una ruta de ingesta r , ya sea ingestión o inhalación, de las emisiones anuales i (año.kg⁻¹).

El impacto por metales se realiza en un horizonte de tiempo infinito y como vía de exposición se asume el concepto de bio-concentración en referencia a los metales así como para contaminantes orgánicos e inorgánicos a través de todas las vías de ingesta (agua, aire, alimentos) (Van Zelm, et al., 2007).

3.4.2.6 *Ecotoxicidad terrestre*

En esta categoría se contemplan los efectos de los compuestos tóxicos sobre los ecosistemas terrestres. En las categorías de toxicidad el factor transporte tiene especial relevancia ya que los contaminantes tóxicos no permanecen en el medio (aire, suelo, agua superficial, etc.) donde fueron emitidos sino que pueden desplazarse y afectar otros sistemas. Un compuesto puede llegar a ser más dañino en un medio diferente al de su emisión.

El efecto de la ecotoxicidad debido a los cambios en la producción de bienes y servicios se divide en tres factores:

$$\frac{\partial PDF_{tox}}{\partial C_x} = \frac{\partial PDF_{tox}}{\partial TU_k} * \frac{\partial TU_k}{\partial C_x} \quad (30)$$

Donde TU_k representa la toxicidad efectiva (en unidades toxicológicas) de un grupo de contaminantes con el mismo modo de acción y C_x es la concentración de una sustancia x en el ambiente con modo de acción k .

El valor típico de $\partial PDF_{tox}/\partial C_x$ es 0.55 unidades de efectos tóxicos por unidad añadida de sustancia x por modo de acción o tipo de ecosistema.

3.4.2.7 *Eutrofización*

La eutrofización acuática puede ser definida como un enriquecimiento de nutrientes del medio ambiente acuático. La eutrofización de agua como resultado de actividades humanas es uno de los principales factores que determinan la calidad ecológica del agua. Para la caracterización de eutrofización de agua solo se toman en cuenta aquellos nutrientes que son limitantes de la biomasa. El crecimiento de algas está determinado por muchos factores pero principalmente por los macronutrientes fósforo y nitrógeno.

El incremento de estos macronutrientes puede generar un cambio indeseable en la composición de especies y por ende en el aumento de la producción de biomasa en los ecosistemas tanto acuáticos como

terrestres. La contaminación del agua y el consiguiente aumento en las algas, producirá la disminución del contenido de oxígeno en el ecosistema a causa del incremento en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) por la descomposición de esta biomasa. El incremento en la DBO puede conducir a alcanzar condiciones anaeróbicas que provocarán la descomposición causada por bacterias anaeróbicas que liberarán CH_4 , H_2S y NH_3 que tienen el potencial de llevar a la desaparición la vida del ecosistema.

En la práctica, las sustancias relevantes incluyen fósforo y compuestos de nitrógeno emitidos al agua y el suelo, así como el amoníaco (NH_3) y óxido de nitrógeno (NO_x) emitida al aire.

Existen varias rutas por las que compuestos de P y N pueden llegar al agua. Una de ellas es la emisión difusa a través del suministro de nutrientes en tierras agrícolas principalmente por el riego con aguas residuales tratadas, los cuales ingresan a los cuerpos de agua por escorrentía superficial y lixiviación, así como la deposición atmosférica; sin embargo, influye la textura del suelo, la pendiente y el tipo de uso entre otros factores. Ambas rutas de emisión realizan un aporte significativo a los sistemas de agua dulce.

El modelo de caracterización utilizado en esta categoría se denomina CARMEN por sus siglas en inglés (Cause effect Relation Model to support Environmental Negotiations). Este modelo calcula el cambio en la carga de nutrientes en las aguas subterráneas, aguas continentales y mares costeros; modela el transporte de nutrientes de origen agrícola y la deposición atmosférica. A partir de los cálculos realizados se obtuvo que la atribución de las emisiones de nitrógeno de las tierras agrícolas en Europa se debe en un 31% debido a la deposición atmosférica de NH_y y NO_x , en 28% debido al estiércol y 41% por suministro de fertilizantes.

Con CARMEN es posible evaluar el factor de persistencia de eutrofización (FF_x en año/ km^3), el cual se puede describir como el incremento de la concentración $dC_{x,j}$ en t/km^3 en un sistema acuático expuesto a un aumento de la tasa de emisión dM_x ($\text{t}/\text{año}$).

$$\text{FF}_x = \frac{dC_{x,j}}{dM_x} \quad (31)$$

Esta ecuación se aplica para evaluar el factor destino del agua marina y de agua dulce por separado. Los resultados obtenidos utilizando el modelo revelan que una alta concentración de 10,000 g/L inhibe la aparición de cualquiera de las especies de la macrofauna, incluso si todas las demás condiciones son óptimas. En un rango entre 300 y 10,000 g/L se presenta una disminución significativa del número de especies debido a que se presenta una ausencia de los requisitos esenciales para la vida acuática de invertebrados (Beusen, 2005).

3.4.2.8 Ocupación de suelo agrícola

La mayoría de los procesos de producción requieren cierta área de tierra o suelo, la cual debe permanecer ocupada durante un tiempo determinado en el cual se fabrican o desarrollan un número específico de bienes o servicios. No todos los tipos de ocupación ejercen el mismo efecto sobre la biodiversidad. La categoría de impacto por uso de suelo refleja el daño ocasionado a los ecosistemas debido a los efectos

de ocupación y transformación de suelo. Aunque existen varios factores que influyen en el uso de suelo y pérdida de biodiversidad, el modelo de caracterización se basa en los siguientes mecanismos:

- 1) Ocupación de un área determinada durante un tiempo definido. Se refiere al uso continuo de un área de suelo, sin especificar lo que era antes, por causa de falta de datos.
- 2) Transformación de una determinada superficie. Representa la conversión de un estado a otro y el tiempo que se necesitaría para restaurar el área transformada. La restauración puede ser un proceso totalmente natural o puede ser ayudado mediante la adopción de medidas que aceleren dicho proceso.

Ambos mecanismos se pueden combinar, a menudo la ocupación sigue de una transformación, sin embargo, la ocupación se produce en un área que ya ha sido convertida (transformada). En tales casos no se asigna ningún impacto por la transformación del sistema de producción que ocupa una superficie.

Para la caracterización del uso de suelo el modelo utiliza el enfoque que actualmente utiliza la metodología CML (Guinée, et al., 2002). Este enfoque contempla los diferentes tipos de uso de suelo definidos como $m^2 \cdot \text{año}$.

1. Ocupación de suelo agrícola
2. Ocupación de suelo urbano
3. Transformación de suelo natural

En el presente estudio solo se hace el cálculo de ocupación de suelo agrícola y para ello basta con la cantidad de área ocupada ($m^2 \text{ año}$).

El indicador para la ocupación de suelo consiste en el potencial de fracción de especies desaparecida (PDF) y se determina el impacto ejercido multiplicando este factor por la densidad de especies (SD). Se obtiene multiplicando el PDF por el tiempo de restauración (PDF*año) y la densidad de especies (SD). El impacto generado se determina multiplicando este factor por los m^2 utilizados y se expresa como (PDF*año).

El potencial de fracción de especies desaparecidas es influenciado por la relación área-especies, llamada también “island bio-geographical theory” McArthur and Wilson (1967). Esta relación se describe mediante el número de especies presentes y el tamaño del área:

$$S = cA^z \quad (32)$$

En donde S representa el número de especies, A corresponde al tamaño del área (m^2), c el número de especies y z es el factor de acumulación de especies en función del tamaño del área. Los factores c y z son específicos para cada tipo de uso de suelo.

Al aplicar la relación área-especies se asume que se realiza un daño al ecosistema debido a que este no puede volver a su estado inicial. Si el número de especies en la zona ocupada es menor al inicial se considera la ocupación como un daño. La magnitud del daño depende de la relación área-especies.

Cuando se evalúa el efecto de la ocupación de un área de suelo se analiza las diferencias presentadas en el entorno respecto al estado inicial o zona de referencia, durante el periodo que esta área se encuentra ocupada. Se presentan dos efectos:

- 1) El efecto regional debido a la diferencia del tamaño si hay o no ocupación. Es decir, la ocupación restringe el tamaño de uso de suelo de referencia (entorno natural), pero no aumenta el tamaño del área utilizada.
- 2) El efecto local que se refiere al número de especies en el área ocupada el cual depende de los valores c y z para un tipo de uso i , comparándose con el número de especies existentes si la zona no estuviera ocupada.

El daño por ocupación de suelo se determina mediante la siguiente ecuación:

$$ED_{occ} = t * A_r \frac{\Delta S_r}{S_r} \quad (33)$$

Donde ED_{occ} representa el daño ambiental causado por la ocupación de suelo, A_r la magnitud del área de referencia, S_r el número de especies en la región y ΔS_r la diferencia entre el número de especies existentes en el estado de referencia y el estado actual.

El daño por transformación de suelo se calcula con la siguiente ecuación:

$$ED_{trans} = \left(z_0 + \frac{c_0 - c_i A_0^{z_i - z_0}}{c_0} \right) * A_{trans} * t_{rest} \quad (34)$$

El factor de caracterización se define como:

$$CF_{trans} = \left(z_0 + \frac{c_0 - c_i A_0^{z_i - z_0}}{c_0} \right) * t_{rest} * SD \quad (35)$$

Según varias fuentes, el valor del factor de acumulación de especies z , puede variar entre 0.1 y 0.4 dependiendo el tamaño del área y el tipo de uso, se recomienda un valor de 0.25 como una buena suposición para z (Köllner, 2001). Por otro lado, comparando los seis tipos de uso de suelos diferentes (pradera, bosque, construido, tierra sin cultivar, entre otros) se analizó la variabilidad del factor z , encontrándose que en pequeñas escalas (0.01m²-10m²) y escalas extremadamente altas (>100 km²) z es menor que en la escala intermedia.

3.4.2.9 Agotamiento de agua

El agua es un recurso escaso en muchas partes del mundo, pero abundante en otros lugares. A diferencia de otros recursos naturales no existe un mercado global que asegure su distribución mundial. Es importante tomar en cuenta esta categoría de impacto ya que la extracción de agua en una región donde existe escasez de este recurso puede causar un daño importante a los ecosistemas y a la salud humana, además se debe considerar que los tipos de usos del agua dan lugar a la escasez.

De manera general, el uso del agua ha sido investigado en términos simples de ICV en unidades de masa o volumen, sin un análisis de caracterización posterior que pondere los diferentes caudales de uso para tener en cuenta las diferencias importantes entre los tipos de fuentes del recurso y los lugares de uso. Sin embargo, la categoría de impacto uso de agua, está estructurada para capturar el uso significativo del agua en las zonas de baja disponibilidad (Bare, Norris, Pennington, & Mckone, 2003).

En esta categoría se utiliza un indicador que consiste en la cantidad de agua utilizada. Se considera el tipo de recurso utilizado: agua de lago, agua de río, agua subterránea o agua de origen natural no especificada (Goedkoop, et al., 2013).

3.4.2.10 Agotamiento de recursos minerales

Los minerales son formados a través de procesos geológicos que tienen una composición química característica, una estructura altamente ordenada y propiedades físicas específicas. Estos elementos estuvieron presentes cuando se formó la Tierra, posteriormente al enfriarse, los procesos geológicos crearon áreas en las cuales quedaron concentrados, a éstos depósitos formados en la naturaleza se les llama minas. Actualmente los minerales se pueden encontrar en diferentes depósitos, algunos de los cuales siempre se extraen como subproducto, tal es el caso del molibdeno, el galio y el indio.

El hombre generalmente extrae primero los mejores recursos y deja para futuras extracciones los de menor calidad, por lo que el daño a los recursos lo experimentarán las generaciones futuras, que tendrán que realizar mayores esfuerzos por extraer los recursos minerales que queden. Este esfuerzo extra recibe el nombre de energía de más. Por lo que el potencial de agotamiento de los recursos minerales se refiere a la energía de más por kg de mineral extraído, como resultado de la disminución del nivel de minerales.

El método analiza la extracción de minerales de depósitos naturales mediante el aumento de los costos de extracción de los productos básicos. Este costo puede ser calculado multiplicando el aumento del costo de extracción por una cantidad que se extrae durante un periodo determinado.

$$Agotamiento\ Fósil = \sum_{t=1}^T \left(\frac{\Delta C_{kg}}{\Delta Y_{kg}} * P_{kg,t} * \Delta Y_{kg} * \frac{1}{(1+d)^t} \right) \quad (36)$$

El daño ocasionado por extracción de recursos minerales se expresa en US\$, ΔC_{kg} representa el incremento del costo (\$/kg), ΔY_{kg} corresponde a la masa de material extraído (kg), $P_{kg,t}$ la cantidad de recurso extraída en un año t (kg/año), d es la tasa de disminución y T el periodo considerado (años).

El factor de caracterización para la extracción de recursos minerales expresado en términos de masa se define como:

$$CF_{kg} = \sum_{t=1}^T \left(MCl_{kg} * P_{kg,t} * \frac{1}{(1+d)^t} \right) \quad (37)$$

Donde MCl_{kg} se refiere al incremento en el costo marginal (\$/kg²)

La metodología ReCiPe se enfoca en el agotamiento de depósitos de diversos minerales tomando en cuenta la distribución geológica real de los metales y se expresa en Fe-equivalentes (Goedkoop, et al., 2013).

3.4.2.11 Agotamiento de combustibles fósiles

Con el paso del tiempo y la extracción de recursos, las fuentes convencionales se han ido agotando, lo cual impulsa el surgimiento de fuentes no convencionales. Es por esto que la evaluación de esta categoría se basa en el cambio proyectado de la extracción de recursos de fuentes convencionales a fuentes no convencionales. La extracción de fuentes no convencionales generalmente requiere energía intensiva y mayores costos, lo cual significa que el uso de fuentes no convencionales es viable, siempre y cuando el precio de los combustibles sea lo suficientemente alto como para cubrir los costos de producción.

El término combustible fósil se refiere a un grupo de recursos que contienen hidrocarburos. Este grupo incluye los materiales volátiles como el metano, la gasolina líquida y los materiales no volátiles. Esta categoría de impacto también está relacionada con el concepto de agotamiento de recursos y energía de más. En este caso se refiere a la energía de más por MJ, kg o m³ de combustible fósil extraído, como resultado de la disminución de la calidad de los recursos.

Para efectos del análisis es necesario expresar el resultado en kg de petróleo, para lo cual se debe contar con la densidad del recurso. La densidad del petróleo convencional puede variar entre 800 y 950 kg/m³. Como promedio, se toma la densidad de 850 kg/m³. Un barril de petróleo contiene un estándar de 159 litros.

El factor de caracterización del petróleo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$CF_{kg.oil} = \sum_T \frac{P_{kg,t} * MCI_{kg,t}}{(1 + d)^t} \quad (38)$$

Donde d corresponde al volumen del barril de petróleo, MCI al incremento en el costo marginal, P_{kg} se refiere a la producción anual de petróleo en el año base (3.43*10¹² kg en el año 2000; IEA, 2004). El factor de caracterización se expresa en US\$/kg. Como recurso de referencia se elige el petróleo crudo, 42 MJ/kg (Goedkoop, et al., 2013).

3.5 Software utilizado

Para la realización de la evaluación del impacto de ciclo de vida (EICV), se utilizó el software “Umberto NXT LCA” versión 7.1, programa desarrollado por la empresa “ifu Hamburg”, que permite obtener el perfil de impacto de ciclo de vida, mediante el uso de bases de datos de inventario propias (creadas por el usuario) y bibliográficas (Ecoinvent v3.01, 2013), bajo la metodología ReCiPe v. 1.08.

3.6 Criterios de corte

No se han establecido criterios de corte ya que se han incorporado todos los datos correspondientes a cada una de las etapas de ciclo de vida del billete. Los datos que no se encontraron disponibles fueron modelados utilizando la base de datos Ecoinvent 3.01 y se especifican en las correspondientes etapas de ciclo de vida presentadas en el capítulo 4: Análisis del inventario.

3.7 Calidad de datos

Los datos utilizados para el desarrollo del inventario de ciclo de vida han sido recabados con la mayor precisión, representatividad y coherencia posible en relación con la definición de objetivo y alcance del estudio. Los datos se han recopilado siguiendo el procedimiento establecido por la norma ISO:14044:2006 (ISO, 2006).

Los datos incluidos han sido clasificados como primarios, secundarios y terciarios. Los primarios son los datos relacionados con el proceso de impresión, los cuales se han obtenido directamente de la Fábrica de Billetes del Banco de México, las entradas y salidas del proceso han sido cuantificados respecto al proceso de producción 2013. Los datos secundarios son referentes a la fabricación de materias primas y han sido proporcionados por sus respectivos proveedores mediante cuestionarios específicos para cuantificar los flujos de entradas y salidas de cada uno de los procesos de producción asociados a una cantidad del insumo enviado a Banco de México. Los datos terciarios son aquellos que no se han encontrado disponibles y se han modelado utilizando la base de datos Ecoinvent 3.01 los cuales se presentan en el capítulo 4.

3.8 Procedimiento de recopilación de datos

Para construir el inventario de ciclo de vida se realizó una revisión exhaustiva de documentos como: Cédula de Operación Anual (COA), Licencia Ambiental Única para el Distrito Federal (LAUDF) y los resultados de los análisis realizados por el laboratorio acreditado que brinda servicios al Banco de México en materia de emisiones al aire y residuos peligrosos. Todos los datos utilizados en la etapa de impresión del billete fueron obtenidos directamente de la Fábrica de Billetes del Banco de México.

Con la información obtenida de los documentos anteriormente mencionados se recabaron datos de emisiones al aire, descargas al agua y generación de residuos tanto municipales, como de manejo especial y peligrosos. De la producción total de cada contaminante se realizó un reparto másico entre las denominaciones impresas durante el año 2013. Estos datos permitieron elaborar el inventario para el proceso completo de producción de billetes.

Para la obtención de datos de entradas y salidas en los procesos de los proveedores de la fábrica del Banco de México, se elaboraron cuestionarios específicos para cada uno de ellos y se enviaron a los destinos correspondientes para continuar con la elaboración del inventario de ciclo de vida.

Para los datos faltantes luego de la recopilación de información con proveedores, se implementó la base de datos de ACV Ecoinvent v3.01; así como referencias bibliográficas del proceso de producción de algunos insumos.

La asignación y reparto de entradas y salidas del sistema se realizaron mediante un reparto másico de los flujos correspondientes al año 2013 y a la producción del mismo año (véase capítulo 4).

3.9 Consideraciones del estudio

Con respecto al reparto del consumo energético se incluyó solamente la electricidad utilizada en el proceso de producción, dejando fuera la energía demandada en las áreas auxiliares como lo son las oficinas administrativas, comedor, baños y consultorio médico. El consumo energético en el proceso de impresión se tomó con base en la cantidad de electricidad que el proceso adquiere directamente de la línea de suministro, sin tomar en cuenta la eficiencia eléctrica de las máquinas o de la fábrica en general. Esto es debido a que independientemente de la eficiencia energética del proceso de producción, para el ACV es necesario cuantificar el total de la electricidad consumida.

Se tomó en cuenta un horario laboral de la Fábrica de Billetes de dos turnos que equivalen a 14 horas laboradas durante 5 días de la semana por 48 semanas hábiles al año, lo cual da un total de 3360 horas laboradas al año.

Las consideraciones realizadas en la elaboración del inventario de ciclo de vida se presentan en cada una de las etapas correspondientes, dentro del capítulo 4.

Capítulo 4

4. ANALISIS DEL INVENTARIO

El compendio de procesos unitarios considerados en el análisis obtenidos de la base de datos asociada al software se describen en las Tablas 4.1 y 4.2 respectivamente; los nombres originales de los procesos extraídos de la base de datos Ecoinvent se presentan en el Anexo 1.

Tabla 4.1 Procesos incluidos en el ciclo de vida del billete impreso en papel AD

Etapa de ciclo de vida	Proceso unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ módulos Ecoinvent 3.01 ¹
Extracción de materias primas para fabricación de sustrato	Extracción de materias primas para papel AD	Describe la electricidad disponible para la obtención de 1 kWh en una región determinada.	Electricidad alto voltaje (Alemania)
		Manufactura de pinturas, barnices y similares.	Producción de barniz acrílico
		Cosecha y producción de algodón.	Producción de fibra de algodón
		Suministro de vapor y aire acondicionado basado en los combustibles líquidos.	Gas natural (Europa)
		Manufactura de químicos básicos.	Producción de químicos básicos
Producción de sustrato	Producción de papel AD	Entradas y salidas del proceso (electricidad, agua, gas natural, insumos, residuos).	Proveedor de papel AD
		Tratamiento y disposición de residuos peligrosos.	Residuos peligrosos para incineración
Extracción y producción de materias primas	Producción de tintas	Manufactura de pinturas, barnices y similares.	Producción de tinta para impresión offset
	Producción de planchas calcográficas	Fundición de lingotes de latón.	Producción de latón
	Producción de planchas y láminas offset	Producción de acero al cromo 18/8.	Producción de hoja de acero, 2mm
		Proceso de extracción de materias primas hasta la entrega en la planta.	Producción de hoja de polimetil metacrilato
Extracción de materias primas para producción de empaques	Empaques	Describe la electricidad disponible para la obtención de 1 kWh en una región determinada.	Electricidad, alto voltaje, mix [US]
		Extracción de materias primas hasta la entrega en planta.	Producción de nylon
		Materias primas, transporte, proceso de extrusión.	Producción de película para embalaje, polietileno de baja densidad
		Tratamiento y eliminación de residuos no peligrosos.	Residuo de cartón
		Gestión de residuos sólidos, incineración.	Residuo de polietileno

Etapa de ciclo de vida	Proceso unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ módulos Ecoinvent 3.01 ¹
Extracción de materias primas para producción de empaques	Contenedores	Describe la electricidad disponible para la obtención de 1 kWh en una región determinada.	Electricidad, alto voltaje, mix [US]
		Extracción de gas natural.	Gas natural
		Fabricación de plásticos y caucho sintético.	Producción de polietileno baja densidad, granulado.
		Industria básica de hierro y acero.	Producción de varilla de acero
		Fabricación de metales preciosos y no férreos.	Producción de hoja de aluminio
Importación de materias primas	Transporte de importación de materias primas	Transporte de carga por aire, tierra y/o mar de las materias primas de Banco de México (sustrato, tintas, planchas de latón, planchas y láminas, empaques y contenedores).	Transporte de carga, camión 3.5-7.5t
			Transporte de carga , tren eléctrico (Europa)
			Transporte de carga aéreo
			Transporte de carga, camión 16-32 t
			Transporte de carga, buque transoceánico
Impresión de billetes	Fábrica de Billetes	Describe la electricidad disponible para la obtención de 1 kWh en una región determinada.	Electricidad, alto voltaje, mix [MX]
		Extracción de piedra, arena y arcilla.	Producción de perlita
		HCl generado mediante combustión de cloro e hidrógeno.	Producción de ácido clorhídrico
		Transporte, infraestructura, materia prima, uso de energía, producción de residuos y emisiones generados en la producción de peróxido de hidrógeno.	Producción de agua oxigenada
		Manufactura de pinturas, barnices y similares.	Producción de barniz
		Materias primas, energía consumida, emisiones al aire, descargas al agua, transporte, infraestructura necesarios en la producción de tricloroetileno.	Producción de tricloroetileno
		Materias primas, transporte, emisiones al aire, descargas al agua, demanda de energía e infraestructura necesarios para la producción de isopropanol. Los residuos sólidos no están incluidos.	Producción de isopropanol
		Producción mediante electrólisis a partir de mineral por proceso electrotérmico de ferromanganeso y escoria.	Producción de manganeso
		Mezcla de 15 solventes orgánicos utilizados con más frecuencia.	Producción de solventes orgánicos

Etapa de ciclo de vida	Proceso unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ módulos Ecoinvent 3.01 ¹
Impresión de billetes	Fábrica de Billetes	Desde la recepción de hidróxido de potasio y dióxido de carbono en la puerta de la fábrica, la producción de carbonato de potasio incluyendo materiales, usos de la energía, infraestructura y emisiones.	Producción de carbonato de potasio
		Desde la extracción de materias primas hasta la entrega en planta.	Producción de cloruro de polivinilo
		Incluye la obtención de gas, la conversión de SO ₂ a SO ₃ y la absorción de SO ₃ para producir ácido sulfúrico.	Producción de ácido sulfúrico
		Manufactura de químicos básicos.	Producción de hidróxido de sodio
		Incluye materias primas, uso de energía, infraestructura y emisiones.	Producción de 1-propanol
		Extracción de materias primas hasta la entre en planta.	Producción de acetona
		Manufactura de químicos básicos.	Producción de cloruro de calcio
		Manufactura de químicos básicos.	Producción de etanol
		Incluye materias primas, uso de energía, producción de residuos, emisiones, transporte, infraestructura.	Producción de silicato de sodio
		Proceso de producción incluyendo refinado.	Producción de ácido acético
Incluye materias primas, producción, uso de energía, infraestructura y emisiones.	Producción de dipropilenglicol monometil éter		
Distribución de billetes	Distribución de billetes	Distribución de billetes a Cajeros Regionales y Corresponsales, vía área y terrestre.	Transporte de carga, aéreo
			Transporte de carga, camión 16-32 t
Procesamiento de billetes	Procesamiento	Electricidad utilizada en el procesamiento y destrucción de billetes.	Electricidad alto voltaje, mix [MX]
Disposición final de residuos de producción y empaques	Disp. Res. Prod.	Disposición final de residuos (municipales, RME y peligrosos) generados en la Fábrica del Banco de México.	Disposición final de solventes gastados
			Disposición de lodo residual proveniente del proceso de producción del papel.
			Incineración de residuos de pintura
			Tratamiento para baterías de desecho
			Disposición de residuos sólidos urbanos
			Disposición de residuos plásticos
			Disposición de residuos de papel clasificado
			Disposición de residuos de cartón
Disposición de residuos textiles			

Etapa de ciclo de vida	Proceso unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ módulos Ecoinvent 3.01 ¹
Disposición final de residuos de producción y empaques	Empaques y contenedores	Disposición final en relleno sanitario de empaques.	Disposición de residuos de aluminio
			Disposición de residuos de polietileno
			Disposición de residuos de acero
Disposición final de billete destruido	Disposición de billete destruido	Disposición final de billete destruido en relleno sanitario.	Disposición de residuos de papel sin clasificar

¹ El nombre original de los módulos extraídos de la base de datos se presentan en el Anexo 1.

Tabla 4.2 Procesos incluidos en el ciclo de vida del billete impreso en polímero

Etapa de ciclo de vida	Proceso unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ módulos Ecoinvent 3.01 ¹
Extracción de materias primas para fabricación de sustrato	Producción de polímero	Describe la electricidad disponible para la obtención de 1 kWh en una región determinada.	Electricidad alto voltaje, mix [AU]
		Suministro de vapor y aire acondicionado basado en los combustibles líquidos.	Gas natural
		Desde la extracción de materias primas hasta la entrega en planta.	Producción de polipropileno granulado
		Energía utilizada en el proceso.	Proceso de extrusión de película plástica
Producción de sustrato	Producción de polímero	Gestión de residuos/incineración.	Disposición de mezcla de residuos plásticos
		Transporte y disposición final.	Disposición de residuos de madera.
		Gestión de residuos/incineración.	Disposición de residuos sólidos municipales
		Gestión de residuos/ depósito subterráneo.	Disposición de residuos, depósito subterráneo.
		Transporte y disposición final.	Disposición de residuos polietileno y polipropileno
		Tratamiento y disposición final de residuos no peligrosos.	Disposición de residuos de pintura como residuos, incineración
		Tratamiento y disposición final de residuos peligrosos.	Disposición de residuos peligrosos, incineración
Extracción y producción de materias primas	Producción de tintas	Manufactura de pinturas, barnices y similares.	Producción de tinta para impresión offset
	Producción de planchas de latón	Fundición de lingotes de latón.	Producción de latón
	Producción de planchas y láminas	Producción de acero al cromo 18/8.	Producción de hoja de acero, 2mm
Proceso de extracción de materias primas hasta la entrega en la planta.		Producción de hoja de polimetil metacrilato	
Extracción de materias primas para producción de empaques	Empaques	Describe la electricidad disponible para la obtención de 1 kWh en una región determinada.	Electricidad, alto voltaje, mix [US]
		Extracción de materias primas hasta la entrega en planta.	Producción de nylon

Etapa de ciclo de vida	Proceso unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ módulos Ecoinvent 3.01 ¹	
Extracción de materias primas para producción de empaques	Empaques	Materias primas, transporte, proceso de extrusión.	Producción de película para embalaje, polietileno de baja densidad	
		Tratamiento y eliminación de residuos no peligrosos.	Residuo de cartón	
		Gestión de residuos sólidos, incineración.	Residuo de polietileno	
	Contenedores	Describe la electricidad disponible para la obtención de 1 kWh en una región determinada.	Electricidad, alto voltaje, mix [US]	
		Extracción de gas natural.	Gas natural	
		Fabricación de plásticos y caucho sintético.	Producción de polietileno baja densidad, granulado.	
		Industria básica de hierro y acero.	Producción de varilla de acero	
		Fabricación de metales preciosos y no féreos.	Producción de hoja de aluminio	
	Importación de materias primas	Transporte de importación de materias primas	Transporte de carga por aire, tierra y/o mar de las materias primas de Banco de México (Sustrato, tintas, planchas de latón, planchas y láminas, empaques y contenedores)	Transporte de carga, camión 3.5-7.5 t
			Transporte de carga, tren	
Transporte de carga aéreo				
Transporte de carga, camión 16-32 t				
Transporte de carga, buque transoceánico				
Impresión de billetes	Fábrica de Billetes	Describe la electricidad disponible para la obtención de 1 kWh en una región determinada.	Electricidad, alto voltaje, mix [MX]	
		Extracción de piedra, arena y arcilla.	Producción de perlita	
		HCl generado mediante combustión de cloro e hidrógeno.	Producción de ácido clorhídrico	
		Transporte, infraestructura, materia prima, uso de energía, producción de residuos y emisiones generados en la producción de peróxido de hidrógeno.	Producción de agua oxigenada	
		Manufactura de pinturas, barnices y similares.	Producción de barniz	
		Materias primas, energía consumida, emisiones al aire, descargas al agua, transporte, infraestructura necesarios en la producción de tricloroetileno.	Producción de tricloroetileno	
		Materias primas, transporte, emisiones al aire, descargas al agua, demanda de energía e infraestructura necesarios para la producción de isopropanol. Los residuos sólidos no están incluidos.	Producción de isopropanol	
		Producción mediante electrólisis a partir de mineral por proceso electrotérmico de ferromanganeso y escoria.	Producción de manganeso	

Etapa de ciclo de vida	Proceso unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ módulos Ecoinvent 3.01 ¹
Impresión de billetes	Fábrica de Billetes	Mezcla de 15 solventes orgánicos utilizados con más frecuencia.	Producción de solventes orgánicos
		Desde la recepción de hidróxido de potasio y dióxido de carbono en la puerta de la fábrica, la producción de carbonato de potasio incluyendo materiales, usos de la energía, infraestructura y emisiones.	Producción de carbonato de potasio
		Desde la extracción de materias primas hasta la entrega en planta.	Producción de cloruro de polivinilo
		Incluye la obtención de gas, la conversión de SO ₂ a SO ₃ y la absorción de SO ₃ para producir ácido sulfúrico.	Producción de ácido sulfúrico
		Manufactura de químicos básicos.	Producción de hidróxido de sodio
		Incluye materias primas, uso de energía, infraestructura y emisiones.	Producción de 1-propanol
		Incluye la extracción de materias primas hasta la entrega en planta.	Producción de acetona
		Manufactura de químicos básicos.	Producción de cloruro de calcio
		Manufactura de químicos básicos.	Producción de etanol
		Incluye materias primas, uso de energía, producción de residuos, emisiones, transporte, infraestructura.	Producción de silicato de sodio
		Proceso de producción incluyendo refinado.	Producción de ácido acético
		Incluye materias primas, producción, uso de energía, infraestructura y emisiones.	Producción de dipropilenglicol monometil éter
Distribución de billetes	Distribución de billetes	Distribución de billetes a Cajeros Regionales y Corresponsales, vía aérea y terrestre.	Transporte de carga, aéreo
			Transporte de carga, camión 16-32 t
Procesamiento de billetes	Procesamiento	Electricidad utilizada en el procesamiento y destrucción de billetes.	Electricidad alto voltaje, mix [MX]
Disposición final de residuos de producción y empaques	Disp. Res. Prod.	Disposición final de residuos (municipales, RME y peligrosos) generados en la Fábrica del Banco de México.	Disposición final de solventes gastados
			Disposición de lodos residual provenientes del proceso de producción del papel.
			Incineración de residuos de pintura
			Tratamiento para baterías de desecho
			Disposición de residuos sólidos urbanos
			Disposición de residuos plásticos
			Disposición de residuos de papel clasificado
			Disposición de residuos de cartón
Disposición de residuos textiles			

Etapa de ciclo de vida	Proceso unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ módulos Ecoinvent 3.01 ¹
	Empaques y contenedores	Disposición final en relleno sanitario de empaques.	Disposición de residuos de aluminio Disposición de residuos de polietileno Disposición de residuos de acero
Disposición final de billete destruido	Disposición de Billete destruido	Disposición final de billete destruido en relleno sanitario.	Disposición de residuos de papel sin clasificar

¹ El nombre original de los módulos extraídos de la base de datos se presentan en el Anexo 1.

4.1 Descripción de etapas de ciclo de vida

En el cálculo del inventario de ciclo de vida se consideraron 11 etapas, las cuales se definen en este apartado.

Con base en los datos registrados por la Fábrica de Billetes del Banco de México referente a la producción del año 2013 se obtuvo la cantidad total de piezas producidas y el porcentaje correspondientes a la denominación de \$200 (estos datos son considerados como información reservada). De esta manera se realizó el procedimiento de asignación de entradas y salidas del sistema mediante un reparto másico asociado a la unidad funcional del sistema, según sea el caso.

Para producir 121 piezas de papel AD y 71 de polímero correspondientes a la unidad funcional (UF) antes planteada y tomando un porcentaje de merma del 5% para los dos tipos de sustrato, de acuerdo a los datos proporcionados por la Fábrica de Billetes, obteniendo un total de 127 piezas impresas en papel AD y 74.5 de polímero. Tomando en cuenta 50 piezas por hoja se calculó que es necesario contar con 2.54 hojas de papel AD y 1.46 hojas de sustrato de polímero (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Unidad funcional y unidad de referencia

	Unidad	Tipo de sustrato	
		Papel AD	Polímero
Unidad funcional (UF)	Piezas	121	71
Merma	Piezas/ UF	6	3.5
Total	Piezas	127	74.5

Los datos que conforman el inventario de ciclo de vida para cada uno de los sistemas, se presentan de manera general en las tablas 4.4 y 4.5, por motivos de confidencialidad, estas tablas contienen los datos incluidos en las etapas de extracción de materias primas para la fabricación del sustrato, producción de sustrato, extracción y producción de materias primas, importación de materias primas e impresión de billetes, excluyendo los residuos generados en el proceso de impresión de billetes, los cuales se presentan de manera independiente. Los datos utilizados para las etapas de distribución, procesamiento de billetes, disposición final de residuos de producción y empaques y disposición final de billete destruido se presentan por separado.

Tabla 4.4 Inventario de ciclo de vida para el billete de papel AD

Parámetro	Cantidad /UF ¹	Unidades	Módulo
Insumos			
Textiles	110.8	g	Producción de fibra de algodón
Productos varios	8.62	g	Varios módulos
Barnices y recubrimientos	22.31	g	Varios módulos
Polímeros	10.24	g	Varios módulos
Metales	1.16	g	Varios módulos
Papel	1.21	g	Producción de papel para impresión
Descargas al agua			
DBO	1.97	g	Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO ₅
DQO	4.32	g	Demanda química de oxígeno
SS	0.885	g	Sólidos suspendidos
SST	0.44	mg	Sólidos suspendidos
Grasas y aceites	0.35	g	Aceites gastados, origen industrial
Emisiones al aire			
CO	0.0061	g	Monóxido de carbono
CO ₂	227.58	g	Dióxido de carbono
N ₂ O	0.17	g	Óxido nitroso
NO _x	0.0239	g	Óxidos de nitrógeno
SO ₂	0.0021	g	Dióxido de azufre
Partículas suspendidas totales	0.0084	g	Partículas,>10um
COVs	0.7149	g	Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano, de origen no especificado
Cr III	0.00000006	g	Cromo III
Cr VI	0.00005927	g	Cromo VI
Consumo energético			
Electricidad	1.16	kWh	Electricidad, alto voltaje, mix
Gas natural	0.896	kWh	Gas natural (Europa)
Consumo de agua			
Agua	0.006	m ³	Agua, origen natural
Transporte			
Terrestre	0.177	tkm	Varios módulos
Marítimo	0.93	tkm	Transporte de carga, buque transoceánico
Aéreo	0.136	tkm	Transporte de carga, aéreo
Residuos			
Fibras	0.015	kg	Fibra de algodón
Residuos peligrosos	0.008	kg	Disposición de residuos peligrosos, incineración
Cartón	0.001	g	Disposición final de residuos de cartón
Plástico	0.003	g	Disposición final de mezcla de plásticos

¹ Las cantidades presentadas fueron obtenidas con base en la unidad funcional del sistema.

Tabla 4.5 Inventario de ciclo de vida para el billete de polímero

Parámetro	Cantidad /UF ¹	Unidades	Módulo
Insumos			
Productos varios	2.83	g	Varios módulos
Barnices y recubrimientos	8.34	g	Varios módulos
Polímeros	69.09	g	Varios módulos
Metales	0.68	g	Varios módulos
Papel	0.71	g	Producción de papel para impresión
Descargas al Agua			
DBO	0.2177	mg	Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO ₅
SST	0.2583	mg	Sólidos suspendidos
Grasas y aceites	0.2029	mg	Aceites gastados, origen industrial
Emisiones al Aire			
CO	0.1361	g	Monóxido de carbono
COV's	1.5791	g	Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano, origen no especificado
NOx	0.0129	g	Óxidos de nitrógeno
PM ₁₀	0.4085	g	Partículas,>10um
CO ₂	17.3955	g	Dióxido de carbón
Partículas suspendidas totales	0.0049	g	Partículas>10um
Cr III	0.00000003	g	Cromo III
Cr VI	0.00003477	g	Cromo VI
Consumo energético			
Energía eléctrica	0.538	kWh	Electricidad alto voltaje, mix [AU]
Gas natural	0.086	kWh	Gas natural
Agua			
Agua	0.0015	m ³	Agua, origen natural
Transporte			
Terrestre	0.0783	tkm	Varios módulos
Aéreo	0.0798	tkm	Transporte de carga, aéreo
Marítimo	1.16	tkm	Transporte de carga, buque transoceánico
Residuos			
Basura	0.000216	kg	Disposición de residuos sólidos urbanos
Madera	0.003081	kg	Disposición de residuos de madera
Residuos del proceso	0.015	kg	Disposición de residuos de polietileno/polipropileno
Cartón y papel	0.0034	kg	Disposición de residuo de cartón
Plástico	0.0018	kg	Disposición final de mezcla de plásticos
Residuos peligrosos	0.00076	kg	Disposición de residuos peligrosos, incineración
Solventes usados	0.0014	kg	Disposición de mezcla de solventes gastados
Aceites lubricantes usados	0.0000015	kg	Aceites gastados, origen industrial
Residuos de pinturas	0.0011	kg	Producción final de residuos de pintura como residuos peligrosos, incineración

¹ Las cantidades presentadas fueron obtenidas con base en la unidad funcional del sistema.

4.1.1 Extracción de materia prima para sustratos

Esta etapa incluye la extracción del algodón y de polipropileno respectivamente, así como, otros insumos de producción, electricidad, agua empleada y las salidas del proceso (Tabla 4.1 y Tabla 4.2). Estos procesos fueron obtenidos de la base de datos Ecoinvent v3.01 (2013) con base en las cantidades de insumos necesarias para satisfacer la unidad funcional y a los datos proporcionados por los proveedores.

Para la producción de algodón se eligió un proceso global que abarca la producción en India, China y Estados Unidos, en virtud de que son los principales productores de algodón a nivel mundial.

Los datos utilizados para modelar esta etapa, se presentan en la Tabla 4.6, los cuales fueron cuantificados previamente por el Banco de México.

Tabla 4.6 Datos utilizados para la etapa de extracción de materia prima para sustrato

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades
	Papel AD	Polímero	
Cantidad de hojas de sustrato	2.54	1.49	Piezas/ UF
Peso de sustrato (1 hoja)	122.94	63.08	g/ UF
Dimensiones del billete	66 *141	66 *141	mm
Gramaje	96	84	g/m ²
Peso del billete	0.92	0.81	g

Fuente: (Banco de México, 2014)

4.1.2 Fabricación de sustrato

Se refiere al proceso de fabricación del sustrato, con las correspondientes entradas y salidas.

De acuerdo a los datos proporcionados por los proveedores de la Fábrica de Billetes se realizaron los cálculos pertinentes para obtener las cantidades de entradas y salidas correspondientes a la unidad funcional. En la Tabla 4.7 se presenta un ejemplo de los cálculos realizados. De esta misma manera se llevaron a cabo los cálculos de consumo de energía, consumo de agua, insumos y residuos.

Tabla 4.7 Cálculos realizados en la etapa de producción de papel AD 1

Proceso	Producción papel AD			
Datos proporcionados				
Electricidad	Cantidad reportada	Unidades	Cantidad/UF	Unidades
	1600	kWh/10,000 hojas	0.4	kWh/UF
Cálculo realizado				
$\frac{1600 \text{ kWh}}{10,000 \text{ hojas}} * \frac{1 \text{ hoja}}{50 \text{ pzas}} * \frac{127 \text{ pzas}}{UF} = \frac{0.4 \text{ kWh}}{UF}$				

Para los cálculos de descargas al agua y emisiones al aire se realizó el siguiente procedimiento (Tabla 4.8):

Tabla 4.8 Cálculos realizados en la etapa de producción de papel AD 2

Proceso		Producción papel AD		
Datos proporcionados				
Descargas al agua	Cantidad reportada	Unidades	Cantidad/UF	Unidades
	13	kg/t	1.60	g/UF
Cálculo realizado				
$\frac{13 \text{ kg DBO}}{\text{t de sustrato}} * \frac{1,000\text{g}}{1 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ t}}{1,000,000 \text{ g}} * \frac{122.94 \text{ g}}{\text{UF}} = \frac{1.60 \text{ g}}{\text{UF}}$				

4.1.3 Extracción y producción de materias primas

Esta etapa incluye la extracción y producción de: tintas, planchas de latón para impresión calcográfica, planchas y láminas para impresión offset. Los datos para la fabricación de estos insumos y su composición se consideraron comunes para los dos tipos de sustrato.

En la producción de tintas debido a que la información proporcionada por el proveedor era poco detallada, se extrajo el proceso de fabricación directamente de la base de datos Ecoinvent v3.01 y se asignó todo el consumo de tinta (offset, calcográfica, flexográfica y tipográfica) al proceso “market for printing ink, offset, without solvent, in 47.5% solution state [GLO]”.

Respecto a la producción de planchas de latón para la impresión calcográfica, a falta de información se asignó como 100% latón (market for brass [GLO]).

La producción de planchas y láminas para impresión offset se generó a partir de: “market for tin plated chromium steel sheet, 2 mm [GLO]” y “market for polymethyl methacrylate, sheet [GLO]”.

El procedimiento realizado para el cálculo de esta etapa fue el mismo que se presenta en la etapa anterior.

Con base en la cantidad necesaria de tinta, láminas para impresión offset y planchas para impresión calcográfica requeridas para la producción de un tiro de billetes (50,000,000 piezas) se calculó la cantidad de cada material requerido para satisfacer la unidad funcional.

4.1.4 Extracción y producción de empaques

Incluye los contenedores de billetes, la película expandible, los flejes de plástico y papel bond para los cinchos de los mazos.

Con base en la cantidad necesaria de embalaje para empacar un contenedor (250,000 piezas) de billetes se calculó la cantidad de cada material requerido para satisfacer la unidad funcional referente a su embalaje.

Los cálculos de insumos, consumo energético, consumo de agua y residuos se realizaron como se explica en la Tabla 4.7. Se asumió que los empaques y contenedores son importados de Estados Unidos.

4.1.5 Importación de materias primas

Considera el transporte desde el lugar de origen de cada insumo a la Fábrica de Billetes del Banco de México. Se tomó en cuenta la importación de los siguientes insumos: sustrato, tintas, planchas de latón para impresión calcográfica, planchas y láminas para impresión offset, contenedores de billetes y empaques.

Para la importación de materias primas se ingresaron 5 tipos de vehículos con base en la información proporcionada respectivamente para cada una de las materias primas. Se tomaron en cuenta los diferentes medios de transporte utilizados en la importación de las materias primas desde donde es elaborado el producto hasta la Fábrica de Billetes, así como el peso transportado de los siguientes insumos: sustrato, tintas, planchas calcográficas, planchas y láminas para impresión offset, empaques y contenedor de billetes. Se calcularon las toneladas*kilómetro (tkm) correspondiente a la distancia estimada recorrida para cada materia prima satisfaciendo a la unidad funcional. Las distancias que las materias primas son transportadas desde el lugar de producción hasta la Fábrica de Billetes del Banco de México, se consideran información reservada.

4.1.6 Impresión de billete

Esta etapa incluye el proceso completo realizado en la Fábrica de Billetes del Banco de México. Desde la recepción de insumos en almacén, diseño de originales, pre prensa, proceso de impresión y procesos finales, con las respectivas entradas y salidas del sistema.

Con respecto a los datos recabados mediante la Cédula de Operación Anual 2013 y la Licencia Ambiental Única del Distrito Federal 2013, los cuales fueron cuantificados por el Banco de México, se determinaron las cantidades de entradas y salidas correspondientes a la unidad funcional. Tomando en cuenta que el proceso de impresión es exactamente igual en el sustrato de papel de AD y polímero

Un resma de sustrato de papel AD (500 hojas) tiene un peso de 24.2 kg por lo tanto para satisfacer la unidad funcional incluyendo la merma son necesarios 122.94 g de papel AD (Tabla 4.3).

El billete actual de \$200 impreso en papel AD mide 66mm*141mm, gramaje 86 g/m² y posee un peso de 0.92 g (Tabla 4.3).

Para el billete de \$200 impreso en polímero se contaría con las mismas dimensiones y se estimó su peso en 0.81 g, tomando en cuenta un gramaje de 84 g/m² (Tabla 4.3).

Los consumos energéticos se calcularon a partir de la potencia de cada máquina reportada en las hojas técnicas, el voltaje al que operan y el tiempo de operación de cada una, cuantificando la demanda total que el proceso adquiere de la línea de suministro, sin importar la eficiencia energética de las máquinas.

4.1.7 Distribución

Comprende el transporte requerido para distribuir los billetes desde la Fábrica de Billetes a los Cajeros Regionales y sus Corresponsales. Incluye la distribución de billete nuevo y el regreso del billete no apto para su posterior destrucción.

En esta etapa se considera el peso de la unidad funcional más el embalaje correspondiente, que equivale a 11.62 g por unidad funcional.

Se calculó la distancia que se transporta la unidad funcional, con base en la información proporcionada por Banco de México respecto a la distancia recorrida tanto vía aérea como terrestre para realizar la distribución de billetes partiendo de la fábrica del Banco de México a los Cajeros Regionales y sus Corresponsales,. Los destinos incluidos en la distribución del billete a los Cajeros Regionales y Corresponsales son considerados información reservada.

Para la distancia recorrida vía aérea se tomó un promedio de los 19 destinos, de acuerdo a lo reportado por el Banco de México y se calculó una distancia de 3,947 km viaje redondo a la unidad funcional.

Para el transporte vía terrestre se tomó un promedio de las distancias recorridas de cada Caja Regional a sus respectivas Corresponsales.

Con estas dos distancias y los vehículos correspondientes se conformó la distribución del billete a lo largo del territorio nacional, tomando en cuenta el peso de la unidad funcional y su embalaje.

Los datos utilizados en la etapa de distribución del billete por territorio nacional se presentan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Datos utilizados en la etapa de distribución de billetes

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Módulo ¹
	Papel AD	Polímero		
Distribución del billete				
Transporte aéreo	0.57	0.30	tkm	Transporte de carga, aéreo
Transporte terrestre	1.00	0.52	tkm	Transporte de carga, camión 16-32 t

¹ El nombre original de los módulos extraídos de la base de datos se presentan en el Anexo 1.

4.1.8 Circulación o etapa de uso

De esta etapa solo se obtiene el tiempo de vida útil en el que el billete se mantiene en circulación cumpliendo la función del sistema para el escenario base, (Tabla 3.1), sin embargo, en el apartado 6.2 se presenta el análisis de sensibilidad incluyendo el uso de cajeros automáticos.

4.1.9 Procesamiento de billetes

Esta etapa incluye la destrucción de billetes y la electricidad empleada por máquinas especiales para realizar este proceso. Se tomaron en cuenta las piezas de billetes destruidas en el complejo Legaria así como en los 6 Cajeros Regionales.

Los consumos energéticos se calcularon a partir de la potencia de cada máquina reportada en las hojas técnicas, el voltaje al que operan y el tiempo de operación de cada una, cuantificando la demanda total que el proceso adquiere de la línea de suministro, sin importar la eficiencia energética de las máquinas.

Mediante los datos de consumo energético, tiempo de operación y un promedio de la velocidad de destrucción respecto a cada denominación de las máquinas, se determinó la electricidad necesaria para procesar el número de piezas correspondiente a la unidad funcional. Cabe destacar que para el billete de polímero se tomaron en cuenta las condiciones de operación para el billete de \$50 impreso actualmente en sustrato de polímero.

Los datos utilizados en esta etapa se presentan en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Datos utilizados en la etapa de procesamiento de billetes

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Módulo ¹
	Papel AD	Polímero		
Procesamiento del billete				
Electricidad	0.04291	0.0666	kWh	Electricidad alto voltaje, mix [MX]

¹ El nombre original de los módulos extraídos de la base de datos se presentan en el Anexo 1.

4.1.10 Disposición final de residuos de producción

Comprende la disposición final de todos los residuos generados en el proceso de producción del billete, los empaques utilizados en la distribución del mismo y el transporte de residuos al lugar de disposición.

Para el confinamiento de residuos se crearon 2 fases de ciclo de vida: disposición de residuos de producción, que incluyen residuos municipales, peligrosos y de manejo especial generados en la producción del billete, así como los empaques utilizados para la distribución del mismo. Por otra parte se generó una fase compuesta por el residuo de billete destruido transportado a relleno sanitario, la cual se describe más adelante.

Se consideraron los pesos de los residuos generados con respecto a la unidad funcional, calculados a partir de la generación total presentada en el año 2013 y el tipo de confinamiento más adecuado para cada uno de ellos. Las distancias fueron estimadas partiendo del complejo Legaria al sitio de confinamiento correspondiente a cada tipo de residuo. Los datos utilizados en la etapa de disposición final de residuos de la producción se presentan en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Datos utilizados en la etapa de disposición final de residuos de producción

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Módulo ¹
	Papel AD	Polímero		
Residuos Inorgánicos				
Transporte de residuos	0.002058	0.001207	tkm	Transporte de carga, camión 3.5-7.5 t
Trapos	0.0148	0.0087	g	Disposición final de residuos textiles
Cartón	1.9293	1.1318	g	Disposición final de residuos de cartón
Madera	9.8865	5.7996	g	Disposición final de residuos de madera
Metal ferroso	11.6245	6.8191	g	Disposición final de residuos metálicos
Papel	1.1402	0.6689	g	Disposición final de papel clasificado
Plástico	0.8113	0.4759	g	Disposición final de mezcla de plásticos
Inorgánicos varios	0.6767	0.3970	g	Disposición final de residuos sólidos municipales
Residuos de Manejo Especial				
Transporte de residuos	0.000265	0.000155	tkm	Transporte de carga, camión 3.5-7.5 t
Lodos provenientes de tratamiento de agua	12.2661	7.1955	g	Disposición final de lodos residuales provenientes de la producción de papel
Plásticos como PET, polietileno de alta y baja densidad polipropileno (PP), policloruro de vinilo	0.3061	0.1795	g	Disposición final de mezcla de plásticos
Costras de tintas	0.4026	0.2362	g	Disposición final de residuos de pinturas como residuos peligrosos, incineración
Residuos Peligrosos				
Transporte de residuos	0.018156	0.010651	tkm	Transporte de carga, camión 3.5-7.5 t
Aceites lubricantes usados	0.1214	0.0712	g	Aceites gastados, origen industrial
Aceites gastados	0.0378	0.0222	g	Aceites gastados, origen industrial
Disolventes orgánicos usados	0.1626	0.0954	g	Disposición final de mezcla de solventes gastados
Mercurio	0.000036	0.000021	g	Disposición final de mercurio
Lodos provenientes de tratamiento de agua	0.1249	0.0733	g	Disposición final de lodos residuales provenientes de la producción de papel
Pilas y baterías gastadas	0.0430	0.0252	g	Disposición final de residuos de baterías
Residuos de pinturas	0.0181	0.0106	g	Producción final de residuos de pintura como residuos peligrosos, incineración

¹ El nombre original de los módulos extraídos de la base de datos se presentan en el Anexo 1.

4.1.11 Disposición final de billete destruido

Incluye la disposición final del billete destruido así como el transporte al relleno sanitario. Los datos utilizados en la modelación del escenario de billete destruido en relleno sanitario se presentan en la Tabla 4.12. Se incluye el peso de la unidad funcional y la merma correspondiente (Tabla 4.3).

A partir de un promedio calculado con base en las distancias existentes entre las seis sucursales del Banco de México, así como del complejo Legaria a los rellenos sanitarios correspondientes se estimó la distancia que el residuo de billete es transportado para su disposición final (Tabla 4.12).

Para la disposición final del billete impreso en papel AD se asumió la disposición de papel común bajo el proceso “Disposición de residuos de papel sin clasificar”.

Para la disposición final del residuo de billete impreso en polímero se tomó el módulo de Ecoinvent asociado con: “Disposición de residuo de polipropileno”.

Tabla 4.12 Datos utilizados en el escenario de disposición final de billete en relleno sanitario

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Módulo ¹
	Papel AD	Polímero		
Disposición final del billete				
Transporte	0.002622	0.001439	tkm	Transporte de carga, camión 3.5-7.5 t
Billete destruido	116.84	-	g	Residuo de papel sin clasificar
	-	60.35	g	Residuo de polipropileno

¹ El nombre original de los módulos extraídos de la base de datos se presentan en el Anexo 1.

4.1.11.1 Transporte de residuos a relleno sanitario

El transporte de residuos se ha dividido en dos apartados: el transporte de los residuos de producción a los respectivos sitios de confinamiento y el transporte del residuo de billete destruido a relleno sanitario.

En el transporte de residuos peligrosos se consideró que estos son llevados al sitio de confinamiento ubicado en Mina, Nuevo León.

Para los residuos municipales, de manejo especial y el billete destruido se consideró un promedio de la distancia que recorren los residuos desde la Fábrica de Billetes o en su caso Caja Regional a los respectivos rellenos sanitarios municipales. En el caso del complejo Legaria, los residuos municipales son llevados al relleno sanitario de Tlanepantla, Edo de México.

El transporte de los residuos de producción y del billete destruido se encuentran dentro de las etapas de ciclo de vida: disposición de residuos de producción y disposición de residuo de billete respectivamente.

Capítulo 5

5. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA

En esta sección se analizan y discuten los impactos potenciales resultantes por categoría de impacto; así como las contribuciones porcentuales de cada uno de los procesos unitarios que conforman la producción de los dos escenarios analizados:

- Billeto de papel de alta durabilidad = papel AD
- Billeto de polímero = polímero

En la Tabla 5.1, se describen los procesos unitarios considerados en cada una de las etapas de vida y se presentan las abreviaturas utilizadas.

Tabla 5.1 Etapas de ciclo de vida del estudio de billetes mexicanos

Abreviatura	Proceso	Componentes de etapa
Extr. de MP sustrato	Extracción de materias primas para el sustrato	Electricidad, gas natural, insumos.
Prod. de Sustrato	Producción de sustrato	Emisiones al aire y al agua, uso de agua y materia prima para la elaboración del sustrato del billete y residuos de producción
Extr. y Prod. MP	Extracción y producción de materias primas	Insumos del proceso de fabricación de tintas, planchas calcográficas y planchas y láminas para impresión offset.
Extr. y Prod. Empaques	Extracción de materia prima y producción de empaque	Energía eléctrica, gas natural, agua, materiales de producción y disposición de residuos.
Importación de MP	Importación de materia prima	Transporte por avión, buque, tren y camión para la importación de insumos y transporte de insumos en camión, dentro del territorio nacional.
Impresión	Impresión de billete	Consumo de energía eléctrica, consumo de agua, insumos para la impresión, emisiones directas al aire y agua
Distribución	Distribución	Transporte para la distribución del billete dentro del territorio nacional
Circulación	Circulación	Tiempo de vida útil del billete
Procesamiento	Procesamiento	Energía eléctrica consumida para la selección de billetes aptos o no para la recirculación
Disp. de billete	Disposición final de billete	Disposición final del billete destruido y Transporte a relleno sanitario
Disp. de Res. Prod.	Disposición final de residuos de producción	Incluye la disposición final de los residuos inorgánicos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos del proceso de impresión del billete

Todos los impactos ambientales descritos a continuación están referidos a la unidad funcional, la cual corresponde a 121 piezas de papel AD y 71 piezas de polímero, los resultados totales por categoría se muestran en la Tabla 5.4.

5.1 Cambio climático

Los resultados globales de cambio climático se presentan en la Figura 5.1, en la cual se observa que el papel AD causa mayor impacto que el polímero, lo que se debe fundamentalmente a las emisiones de GEI generadas en el proceso de extracción de materias primas y fabricación del sustrato, particularmente en el cultivo de algodón donde se requiere de fertilizantes y maquinaria cuya fabricación implica la quema de combustibles fósiles aumentando la emisión de GEI al ambiente. La siguiente etapa que contribuye de mayor manera, es la distribución del billete, debido también a la quema de combustibles fósiles efectuado por vehículos automotores y aviones que realizan la distribución de billetes dentro de la República Mexicana.

En el papel AD el impacto global es de 2.87 kg CO₂ eq, en donde la extracción de la materia prima para la producción del sustrato aporta el 28.5% y la distribución el 28.4%. El proceso de impresión participa con el 15.4% del impacto. En la extracción de la materia prima para la producción del sustrato, el principal contribuyente es la fabricación de la fibra de algodón con 38.2%, lo cual proviene de la utilización de energía eléctrica para la transformación de la fibra. En el proceso de distribución el 78.7% del impacto deriva del transporte por vía aérea.

Los resultados obtenidos coinciden con el estudio hecho por el Banco de Inglaterra (2013), en el cual el papel AD tiene un impacto superior al polímero, en donde la producción del sustrato es el principal contribuyente, seguido por el procesamiento del billete, etapa que en el presente estudio solo representa un impacto de 0.9% causado por el uso de 0.43 kWh para el billete de papel AD y 0.066 kWh para el polímero. El escenario polímero registra un impacto global de 1.4 kg CO₂ eq, de los cuales el proceso de distribución es el principal contribuyente con 30.7% de las emisiones de GEI, la extracción de la materia prima aporta el 20.5% y el proceso de impresión el 18.3%. Con la utilización de polímero existe un ahorro del 1.5 kg de CO₂ eq por unidad funcional, lo que equivale a la reducción de producción de GEI en un 48.78%.

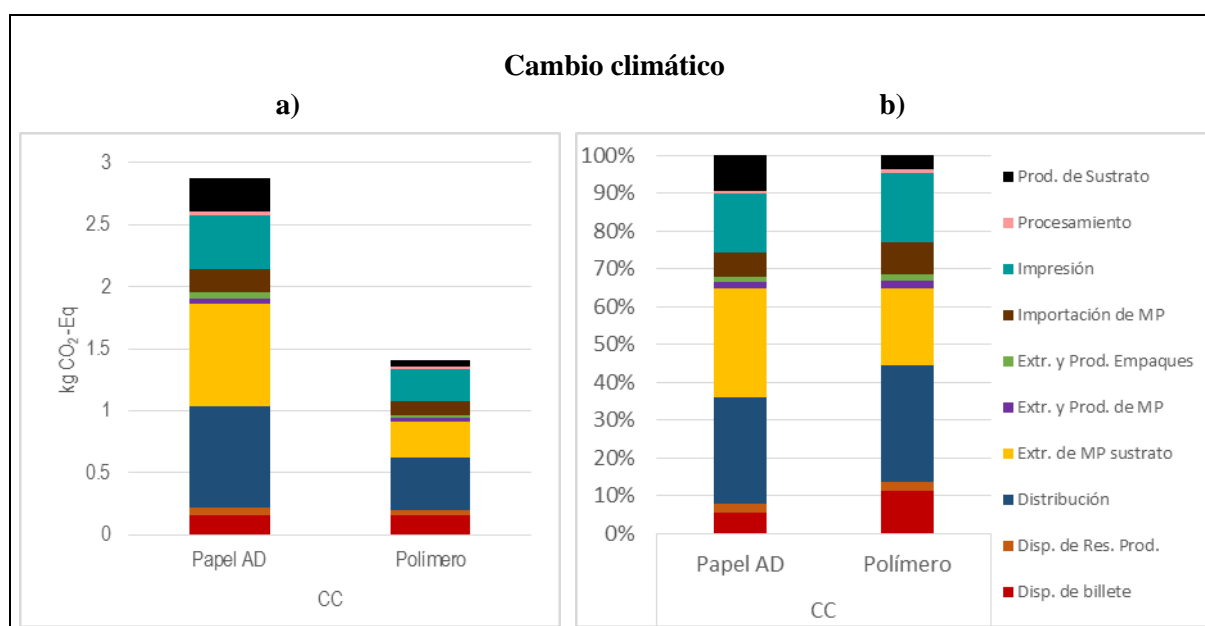


Figura 5.1 Contribuciones a la categoría de cambio climático, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.

5.2 Reducción de capa de ozono

En esta categoría de impacto el papel AD registra un total de $2.41E-07$ kg CFC-11 eq (Figura 5.2a), superior al escenario polímero con $5.51E-08$ kg CFC-11 eq. Estos resultados son coincidentes con lo reportado por el estudio hecho por el Banco de Canadá (2011) en donde la utilización de polímero presenta un menor impacto en disminución de la capa de ozono que el papel de algodón.

En el papel AD el 58.7% del impacto proviene de la extracción de materias primas para la elaboración del sustrato, principalmente de la obtención de la fibra de algodón, debido a que el cultivo de este material requiere de la aplicación de fertilizantes e insecticidas cuya fabricación utiliza electricidad, así como el proceso de despepite del algodón en el cual se separa la semilla de las fibras, demanda importantes cantidades de energía, cuya generación produce CFC. La etapa de distribución contribuye con el 22.5% del impacto global (Figura 5.2b), ya que la generación de combustibles produce compuestos fluorocarbonados.

En el polímero, la distribución representa el 51.9% del impacto, seguido por la impresión con 19.5% y la importación con 14%.

Al realizar el análisis de los resultados globales se observa que por unidad funcional, el polímero genera 77% menos agotamiento de la capa de ozono que el papel AD. Situación que se debe primordialmente a que para la producción del papel AD, se utilizan para el cultivo de la materia prima, la fabricación y el transporte de la fibra del algodón importantes cantidades de combustibles derivados del petróleo los cuales generan sustancias que dañan la capa de ozono, a diferencia del polímero, el cual sólo representa el 7% del impacto total en esta categoría.

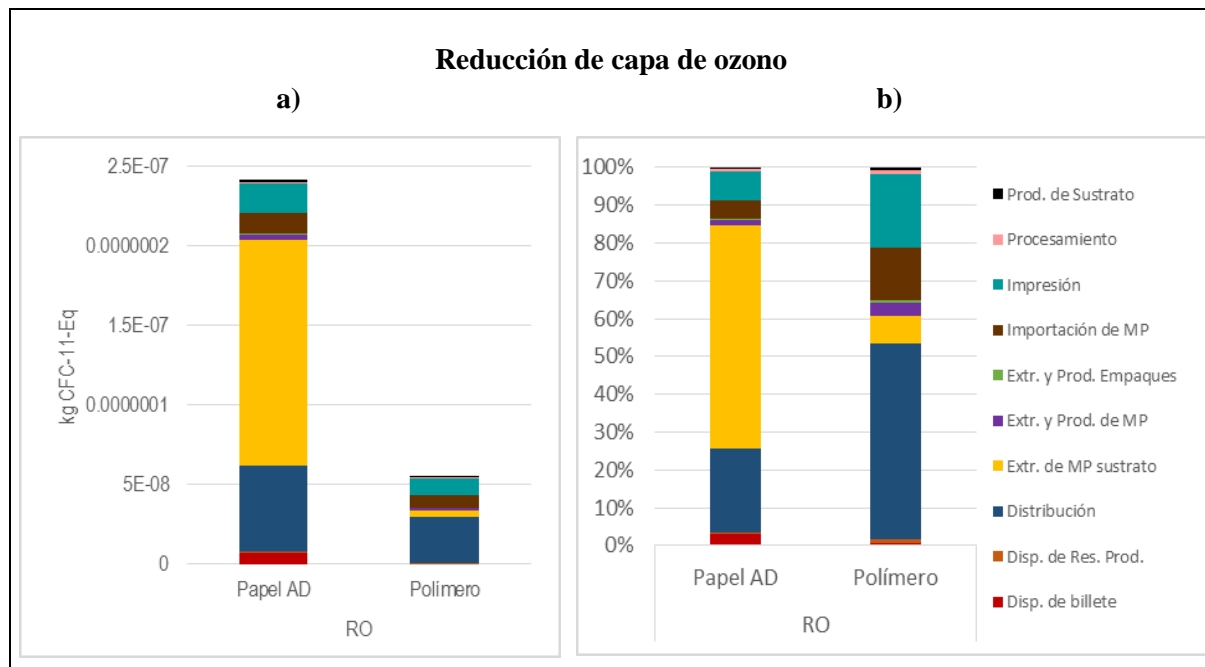


Figura 5.2 Contribuciones a la categoría de reducción de capa de ozono, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.

5.3 Formación de oxidantes fotoquímicos

Los resultados del análisis de los sistemas estudiados se grafican en la Figura 5.3a, en la que se observa que el papel AD tiene un impacto global de 0.01 kg COVNM (compuestos orgánicos volátiles no metano), de los cuales el 41.8% proviene de la distribución, debido a la generación y quema de combustibles y el 22.7% se genera por la extracción de materias primas, específicamente para la producción de algodón, donde los fertilizantes, insecticidas y maquinaria de cultivo generan emisiones de NO_x, SO_x, CO y NH₃, las cuales intervienen en la química atmosférica, contribuyendo a la generación de oxidantes fotoquímicos como el ozono troposférico. En este sentido la producción de papel AD genera una mayor cantidad de COVNM asociados a su menor durabilidad, lo cual coincide con los resultados obtenidos por el trabajo realizado por el Banco de Canadá (2011), estudio que reporta la distribución como principal contribuyente a esta categoría con 58% del impacto y en segundo lugar la etapa de uso en cajeros automáticos, etapa que no fue evaluada en el presente estudio.

El polímero, registra un impacto global de 0.006 kg COVNM, de éste el 35.5% es generado por la distribución del billete, seguido por la producción del sustrato con 19.3% a causa de la extracción de hidrocarburos utilizados en la fabricación del polipropileno. De los datos obtenidos se calcula que el uso de polímero provoca una reducción de 37.9% en formación de oxidantes fotoquímicos por unidad funcional con respecto a la producción de papel AD.

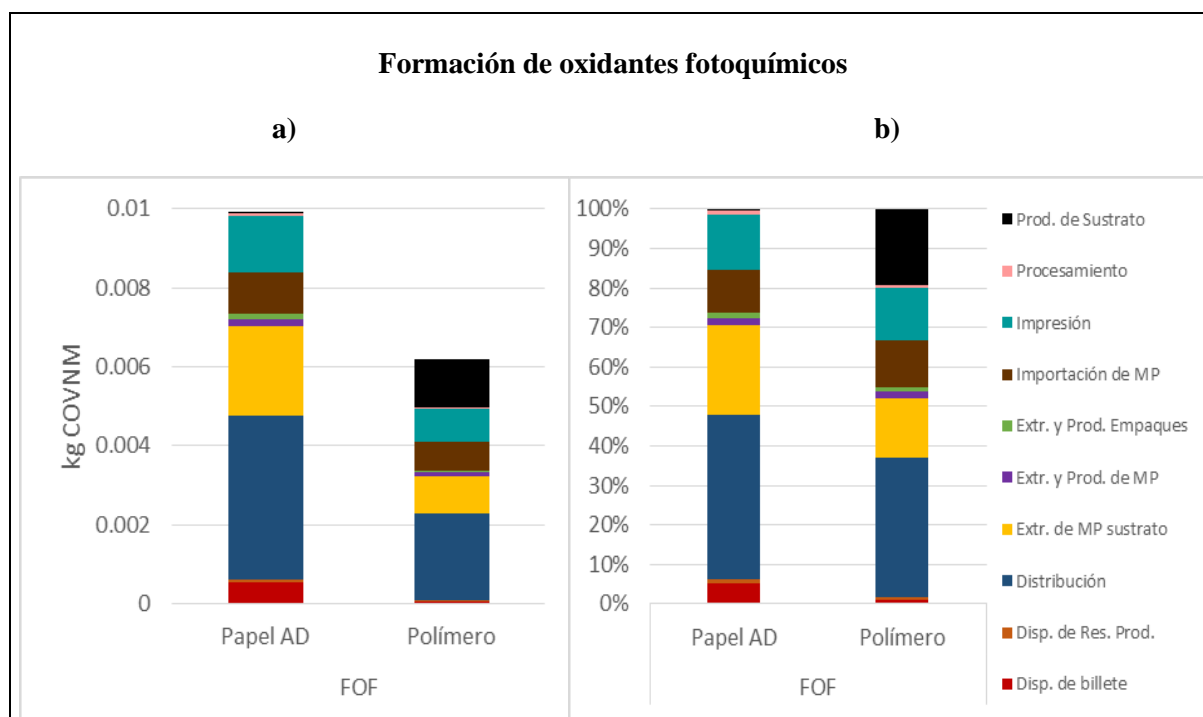


Figura 5.3 Contribuciones a la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.

5.4 Acidificación terrestre

Los contaminantes que generan acidificación tienen una amplia variedad de impactos en el suelo, en las aguas superficiales, aguas subterráneas, organismos vivos y en las edificaciones. Existen muchas emisiones ácidas generadas directamente por el hombre y otras son compuestos ácidos que se han generado a partir de reacciones en el aire. Los resultados de este ACV muestran que el papel AD genera mayores impactos que el polímero (Figura 5.4).

En el papel AD, el impacto global en esta categoría es de 0.012 kg SO₂ eq, de los cuales la extracción de materias primas para la fabricación del papel de algodón es del 37.7% debido principalmente al uso de fertilizantes nitrogenados, la distribución aporta el 22% asociado con la quema de combustibles de origen fósil y el proceso de impresión el 21.7%, por la electricidad consumida; estos procesos implican el uso de combustibles fósiles, los cuales contienen azufre que posteriormente es convertido en SO_x contribuyendo a la acidificación. Lo anterior concuerda con el estudio realizado para el Banco de Inglaterra (2013), que reporta la producción de materias primas y la fabricación del sustrato como los principales contribuyentes a esta categoría de impacto. Estos procesos están estrechamente relacionados con el uso de combustibles fósiles y electricidad.

De la extracción de materias primas para el sustrato, en el escenario papel AD, la obtención de fibra de algodón es el principal generador de sustancias que contribuyen a la acidificación terrestre con 71.7% del impacto. En el proceso de distribución, el 79.5% del impacto proviene del transporte por avión.

El polímero registra una emisión total de 0.005 kg SO₂ eq, que equivale a una reducción del impacto en acidificación del 59% con respecto al papel AD por unidad funcional. En el polímero los procesos con mayor aportación a esta categoría son la impresión (30.7%) y la distribución (28.4%).

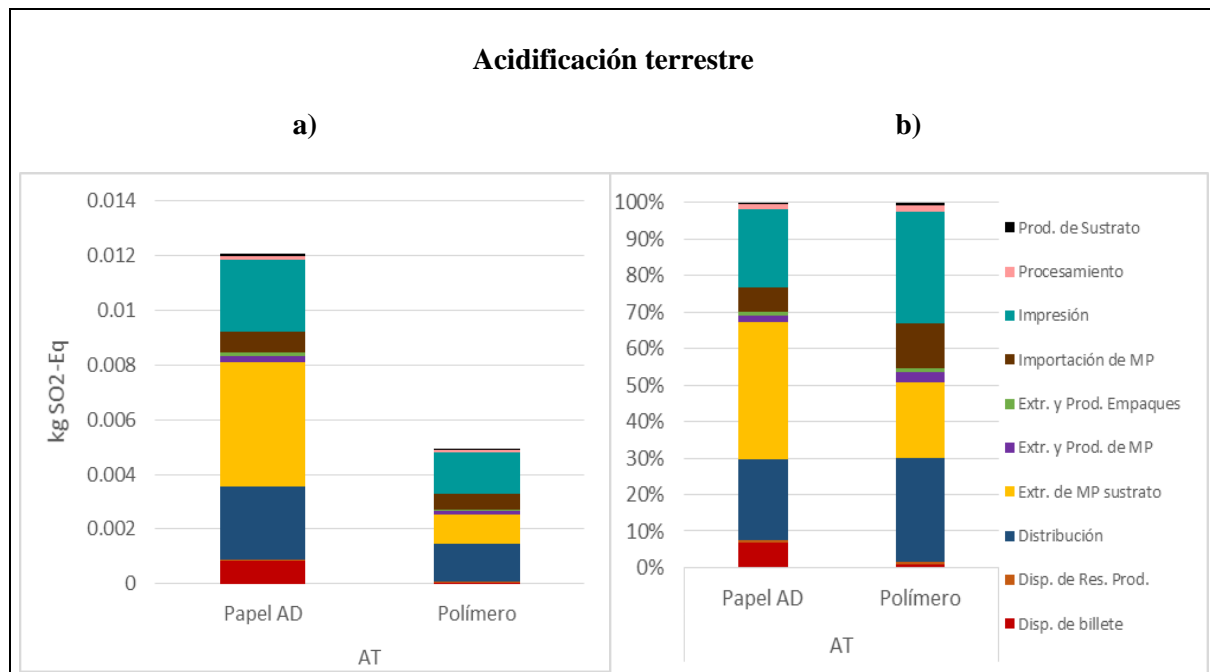


Figura 5.4 Contribuciones a la categoría de acidificación terrestre, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.

5.5 Toxicidad humana

El papel AD presenta un impacto total de 1.25 kg 1,4-DCB eq, valor superior al obtenido por el polímero que registró 0.63 kg 1,4-DB eq, lo cual es debido a la cantidad de billetes necesarios para cumplir la función asociado directamente con la duración del sustrato (Figura 5.5a).

En el papel AD, se identifica la disposición de residuos de producción como el principal contribuyente y la extracción de materias primas para la producción del sustrato como segundo contribuyente. Este resultado difiere de lo obtenido por el Banco de Canadá (2011), en el que los procesos con mayor impacto son el uso a través de cajeros automáticos y la distribución, pero la disposición final no tiene un impacto relevante.

Del análisis por procesos unitarios, se obtuvo que en el papel AD, la disposición de residuos de producción representa el 48% del impacto, debido a los residuos peligrosos generados en la Fábrica de Billetes, como lo son solventes y aceites industriales. La extracción de materias primas para la producción de sustrato contribuye con el 25.9%, debido al uso de fertilizantes y el uso de electricidad representa el 52%.

De acuerdo con lo anterior, el escenario polímero refleja una reducción del 49.7% por unidad funcional en toxicidad humana respecto al papel AD. En el polímero, al igual que el papel AD, el principal contribuyente al impacto es la disposición de residuos de producción con 55.5%, seguido por los procesos de producción del sustrato (16%) e impresión (15%).

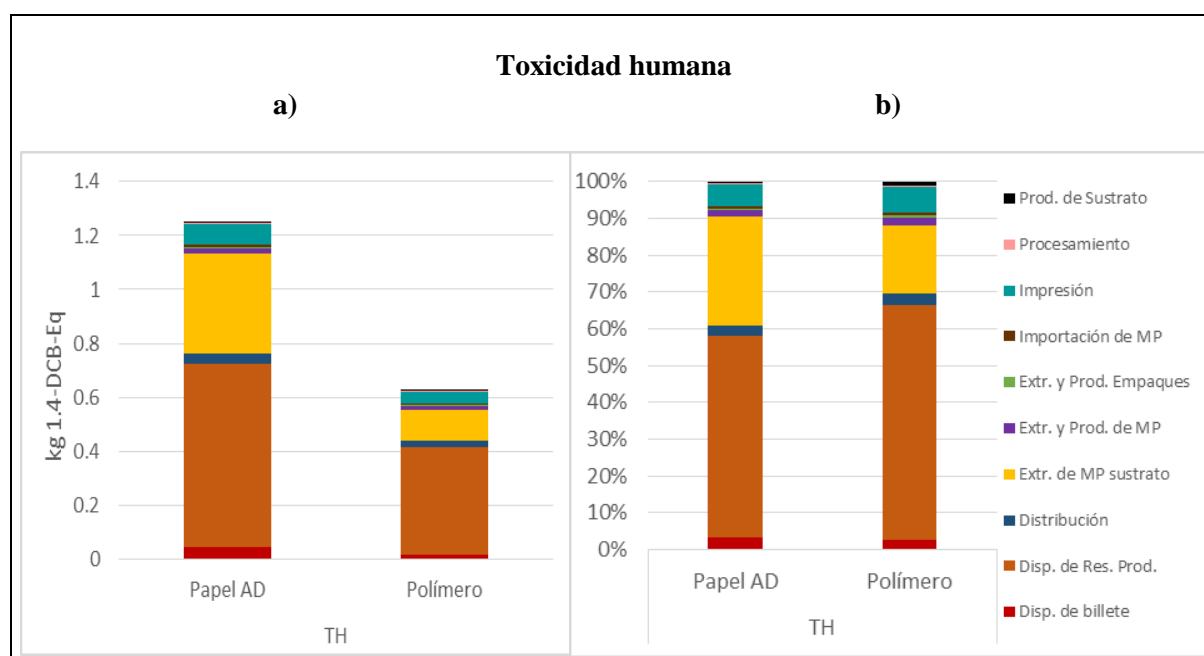


Figura 5.5 Contribuciones a la categoría de toxicidad humana, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.

5.6 Eutrofización de agua dulce

En esta categoría, de acuerdo con la Figura 5.6a, el papel AD registra un total de $7.14E-04$ kg P eq, de este valor la extracción de materia prima para el sustrato aporta el 66.4%, del cual la producción y consumo de energía eléctrica generan el 63.9% del impacto ($3.02E-04$ kg P eq), provocado por las descargas de fosfatos al agua provenientes del uso de fertilizantes. La energía eléctrica en el escenario polímero es de $1.64E-04$ kg P eq, lo que equivale al 89% del requerimiento para la extracción de la materia prima para el sustrato.

El segundo proceso con mayor contribución a la EAD en el papel AD es la impresión con 11.3% en donde el 98.4% del impacto deriva de la producción y uso de energía eléctrica.

El escenario polímero en eutrofización de agua dulce registra un total de $2.96E-04$ kg P eq, lo que equivale a una reducción del 58.5% por unidad funcional respecto al papel AD.

En el polímero la extracción de materia prima para la fabricación del sustrato es el principal contribuyente con 62.4% de impacto, seguido por el proceso de impresión con 15.8%.

Los resultados obtenidos en la presente investigación se compararon con los estudios realizados por el Banco de Canadá (2011) y el Banco de Inglaterra (2013), en los cuales se obtuvo que el papel de algodón presenta mayor impacto que el polímero, e igualmente la obtención de materia prima y la producción del sustrato, son los procesos con mayor impacto en esta categoría.

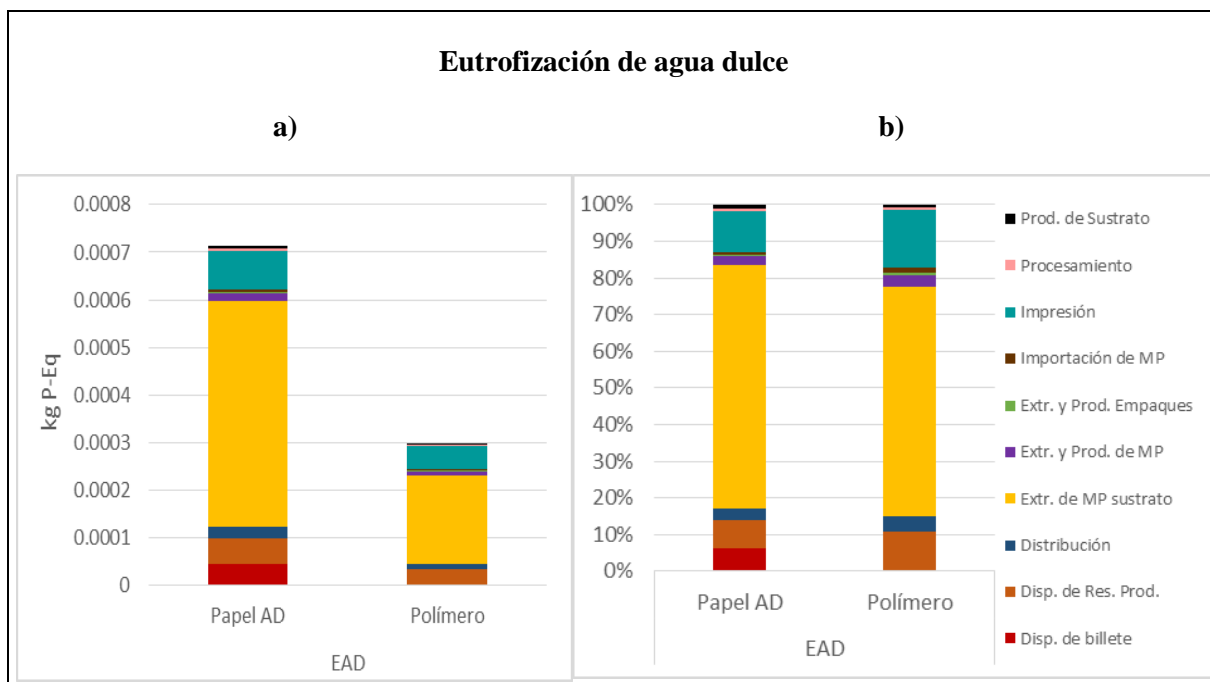


Figura 5.6 Contribuciones a la categoría de eutrofización de agua dulce, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.

5.7 Ecotoxicidad terrestre

Del análisis del inventario se obtuvo que el papel AD tiene un impacto global en ecotoxicidad terrestre de 0.24 kg 1,4-DCB eq, valor superior al obtenido por el polímero, con 0.004 kg 1,4-DCB eq, lo cual se ilustra en la Figura 5.7a.

Para el papel AD el principal contribuyente a esta categoría es la etapa de extracción de materia prima para la obtención del sustrato (72.6%), seguido por la disposición de residuos de producción (26.6%).

En la extracción de materias primas para la elaboración del sustrato, la obtención de fibra de algodón es responsable del 98.4% de las emisiones que contribuyen a la toxicidad terrestre, lo cual está asociado a los pesticidas empleados en el cultivo de algodón. Los resultados concuerdan con lo publicado por el Banco de Inglaterra (2013) en el cual el papel de algodón presenta un impacto mayor al polímero, la evaluación de la ecotoxicidad en ese estudio coincide en que el uso de pesticidas para la producción de algodón es el contribuyente dominante para esa categoría de impacto.

El escenario polímero refleja una reducción del 83.6% por unidad funcional del impacto producido por el papel AD. En el escenario polímero la disposición de residuos de producción genera el 95.6% del impacto.

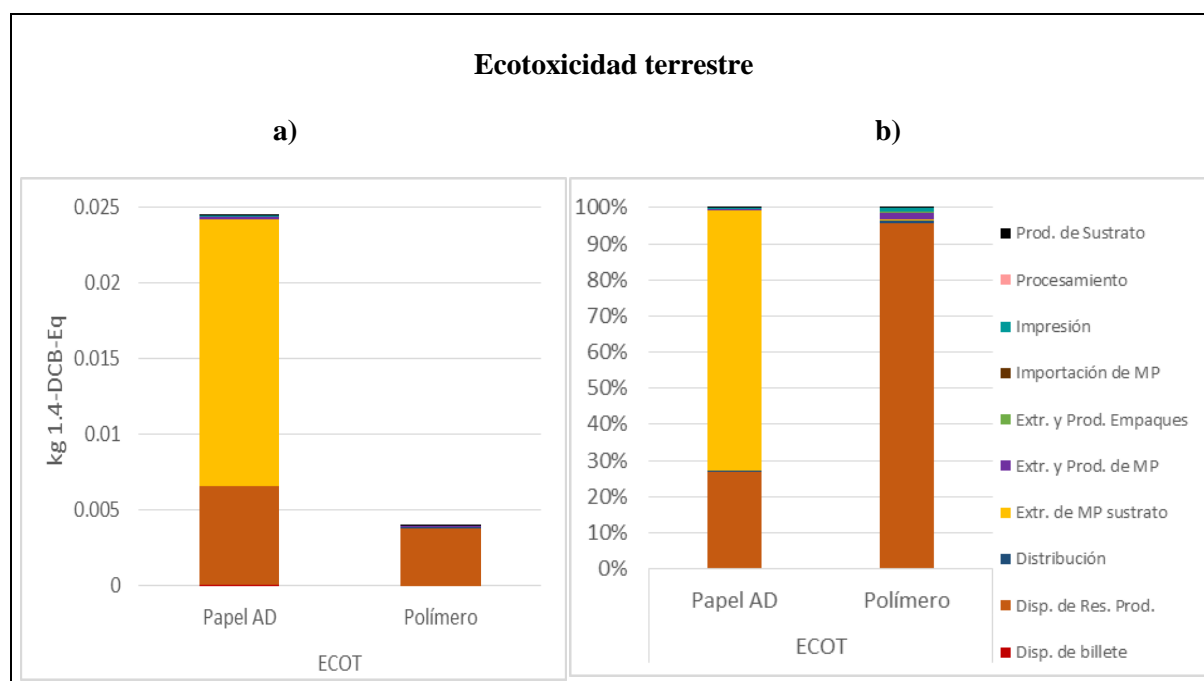


Figura 5.7 Contribuciones a la categoría de ecotoxicidad terrestre, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario.

5.8 Ocupación de suelo agrícola

En esta categoría el papel AD es notoriamente superior al polímero lo que se puede observar en la Figura 5.8a. El papel AD tiene un impacto general de 0.9 m²a, de éste el 86% deriva de la extracción de materias primas para la fabricación del sustrato y el 9.5% del proceso de impresión.

Del análisis de impactos por procesos unitarios se identifica que en el proceso de extracción de materias primas para la fabricación del sustrato el 97.5% está asociado a la fibra de algodón debido a los requerimientos de suelo para el cultivo de la planta.

Por otra parte el polímero tiene un valor de impacto global de 0.04 m²a, que equivale a usar tan solo el 4% de tierra agrícola de lo que ocupa el papel AD, es decir el uso de polímero reduce en 96% la ocupación de suelo. Del impacto total en el escenario polímero el 37% deriva de la extracción de materias primas para la elaboración del sustrato, del cual la extrusión del polipropileno representa el 92.9%.

En los estudios publicados sobre el tema, no se realizó el análisis de ocupación de suelo agrícola.

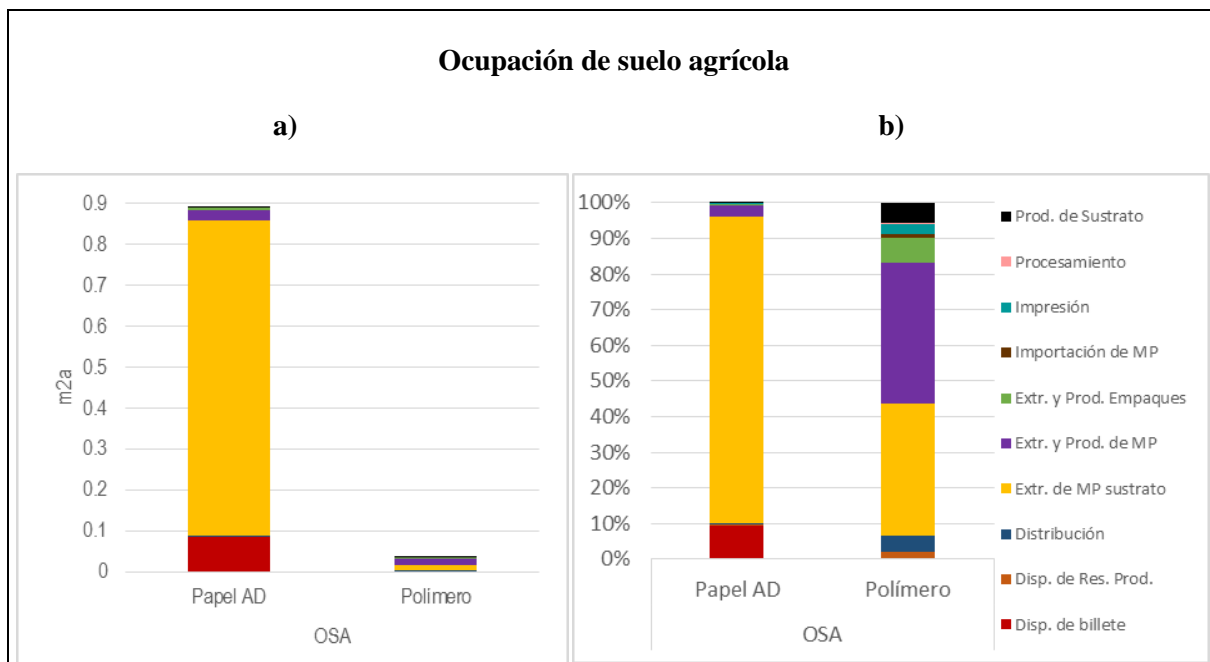


Figura 5.8 Contribuciones a la categoría de ocupación de suelo agrícola, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario

5.9 Agotamiento de agua

En esta categoría destaca el escenario papel AD con un impacto global de 0.19 m³, de los cuales la extracción de materia prima para la fabricación del sustrato representa el 98.3% (Figura 5.9b). Del análisis de impactos por procesos unitarios se observa que la fabricación de la fibra de algodón contribuye con el 95.6% debido al proceso de irrigación para el cultivo de algodón. Estos resultados son coincidentes con lo obtenido por el Banco de Inglaterra (2013) en donde el proceso para la obtención de la materia prima contribuye con más del 95% al agotamiento de agua.

El escenario polímero, presenta un impacto global de 2.24E-03 m³, de éste la fabricación del sustrato, compuesta por los procesos de producción y la extracción de materia prima, representa el 45.8% y la impresión participa con el 32.2%. La importancia de estos procesos en el agotamiento de agua obedece al uso importante de energía eléctrica.

Se calculó que el polímero reduce por unidad funcional el 98.8% del impacto respecto al papel AD. Esta es la categoría de impacto evaluada en la que existe mayor diferencia entre los sistemas estudiados, tal diferencia se explica fundamentalmente por el uso de agua por irrigación para el cultivo de las plantas de algodón.

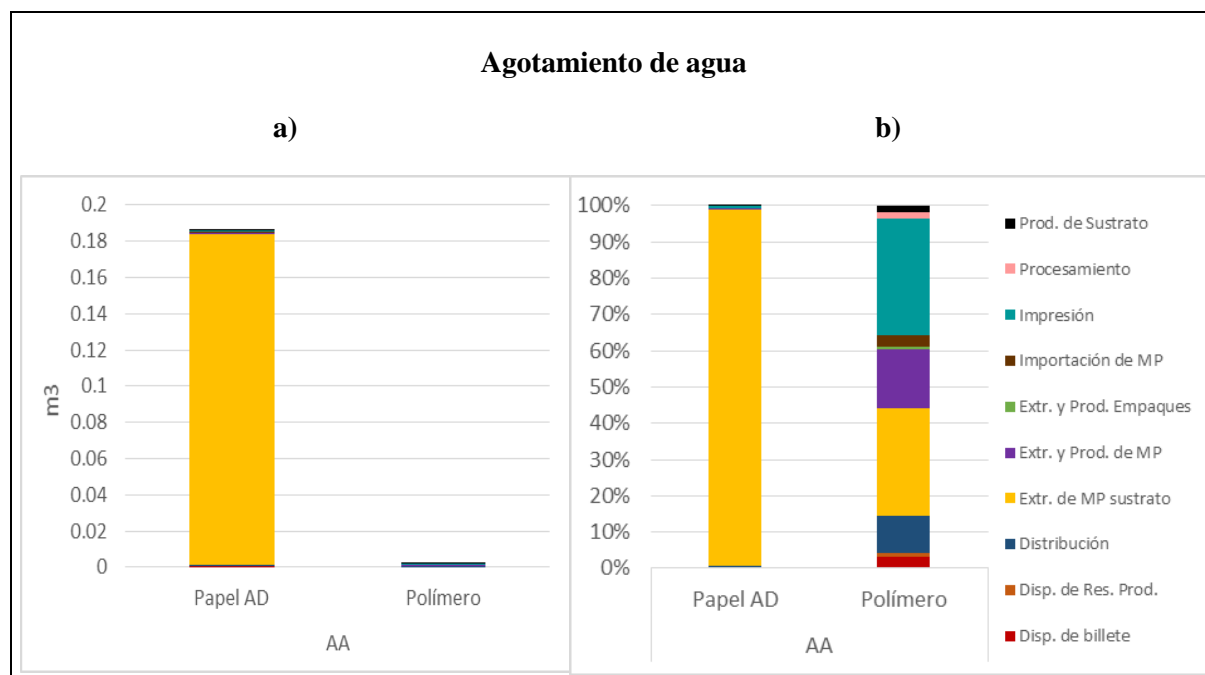


Figura 5.9 Contribuciones a la categoría de agotamiento de agua, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario

5.10 Agotamiento de recursos minerales

En esta categoría el papel AD tiene un impacto global de 0.06 kg Fe eq y el Polímero de 0.018 kg Fe eq, lo cual se ilustra en la Figura 5.10a.

En el papel AD, el 50% del agotamiento de recursos minerales y metales deriva del proceso de extracción de materia prima para el sustrato, el 18.8% del impacto en el papel AD, corresponde a la distribución y el 10.7% a la impresión (Figura 5.10b). En la extracción de materia prima para el sustrato, la obtención de la fibra de algodón representa el 54.5%, proceso que requiere importantes cantidades de energía eléctrica, la que a su vez consume cantidades valiosas de metales por infraestructura para su distribución, como el cobre; también este proceso consume volúmenes importantes de metales y minerales a través de la maquinaria agrícola y los sistemas de irrigación para el cultivo de algodón.

Sin embargo, en el polímero la distribución es el proceso dominante con 34.3% del impacto, el 22% está relacionado con el uso de electricidad en la etapa de impresión y el 12.7% a la extracción de materias primas para el sustrato. En la distribución el 80% del impacto deriva del transporte en camión.

De la comparación de resultados se calculó que la utilización de Polímero reduce en 71% el agotamiento de metales por unidad funcional, respecto al papel AD.

Los trabajos revisados sobre el tema, no evaluaron esta categoría de impacto, por lo que no existen referencias para efectos de comparación con el presente estudio.

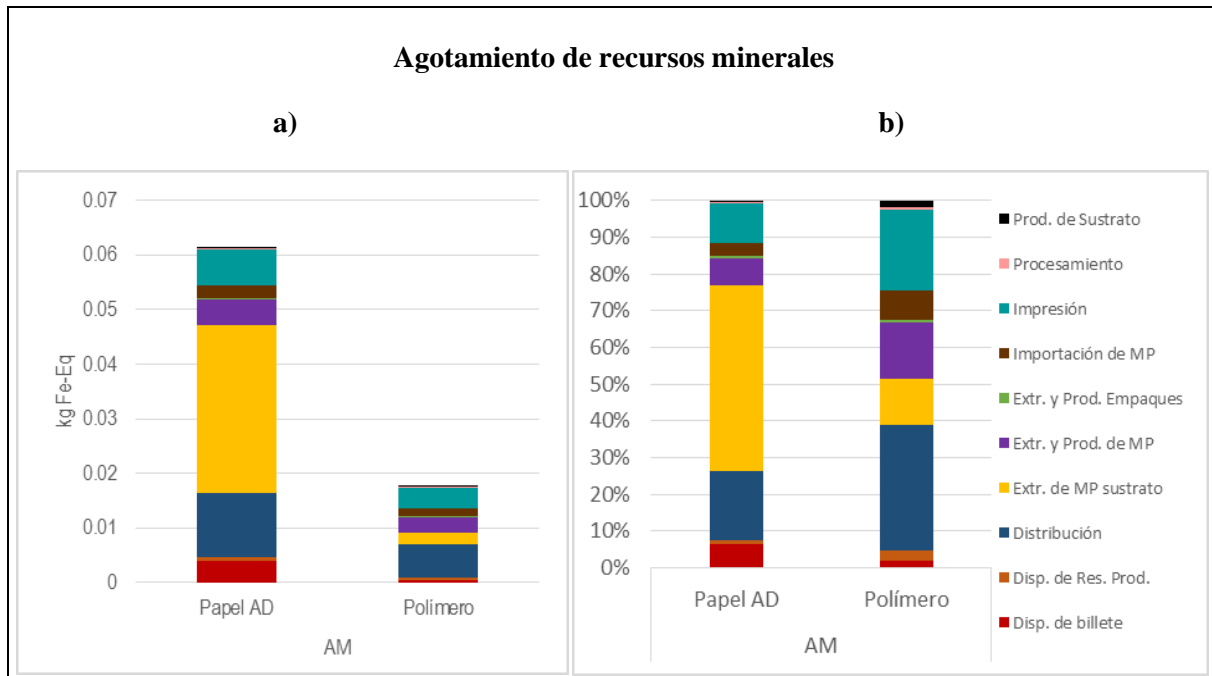


Figura 5.10 Contribuciones a la categoría de agotamiento de recursos minerales, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario

5.11 Agotamiento de combustibles fósiles

En esta categoría el papel AD presenta un impacto general de 0.82 kg petróleo eq (Figura 5.11a) del cual la distribución contribuye con 33.9% debido a los combustibles utilizados y la extracción de la materia prima para el sustrato con 27.4%.

En el proceso de distribución el principal contribuyente es el transporte vía aérea con 78%, debido a que las distancias recorridas y la cantidad de billetes transportados por este medio es mayor que por vía terrestre. De la extracción de la materia prima para el sustrato el 32% del impacto deriva de la producción de fibra de algodón y el 31% de la producción y uso de electricidad.

En el escenario polímero, al igual que el papel AD, la distribución es el contribuyente principal con 32.4%, ligeramente superior al impacto generado por la extracción de materia prima para el sustrato con 32%. Se calculó que la utilización de Polímero tiene un impacto 45% menor por unidad funcional en agotamiento fósil que el papel AD.

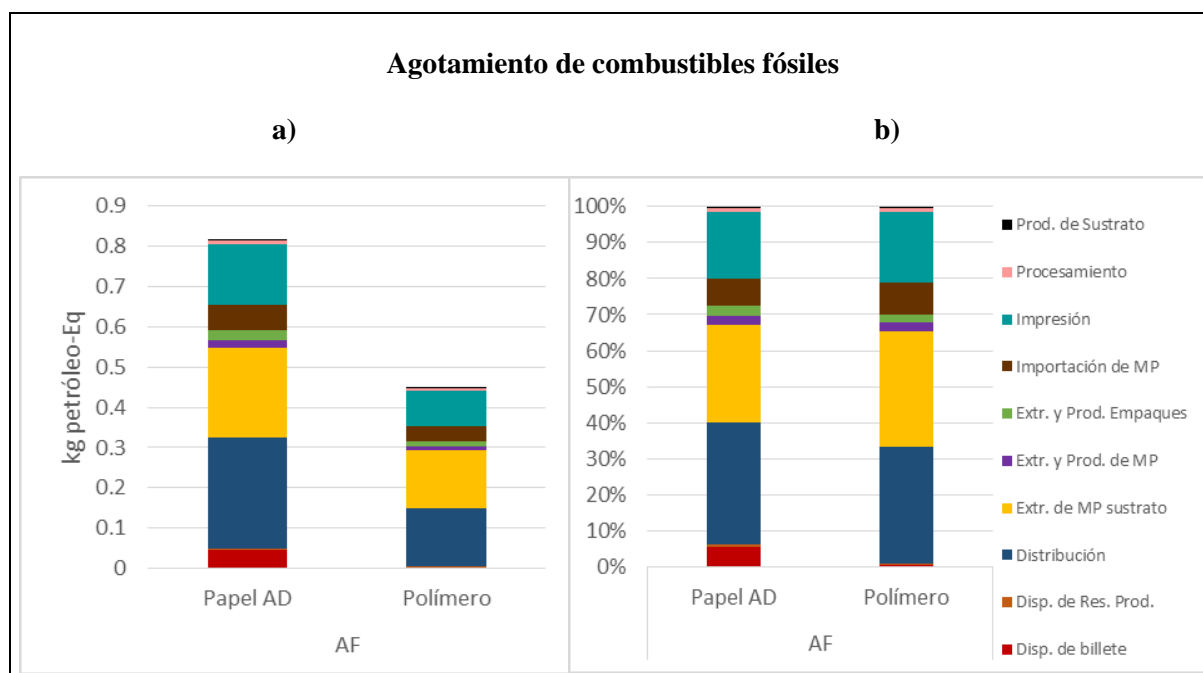


Figura 5.11 Contribuciones a la categoría de agotamiento combustibles fósiles, a) Valores totales por escenario, b) Porcentaje de aportación por proceso para cada escenario

5.12 Impacto global caracterizado

Las Figuras 5.12 y 5.13 ilustran el impacto ambiental resultante, por proceso unitario, para los dos escenarios y para las once categorías analizadas. En cada una de las figuras se ha realizado una normalización de tal forma que se puede realizar un análisis comparativo de manera global entre los sistemas de estudio.

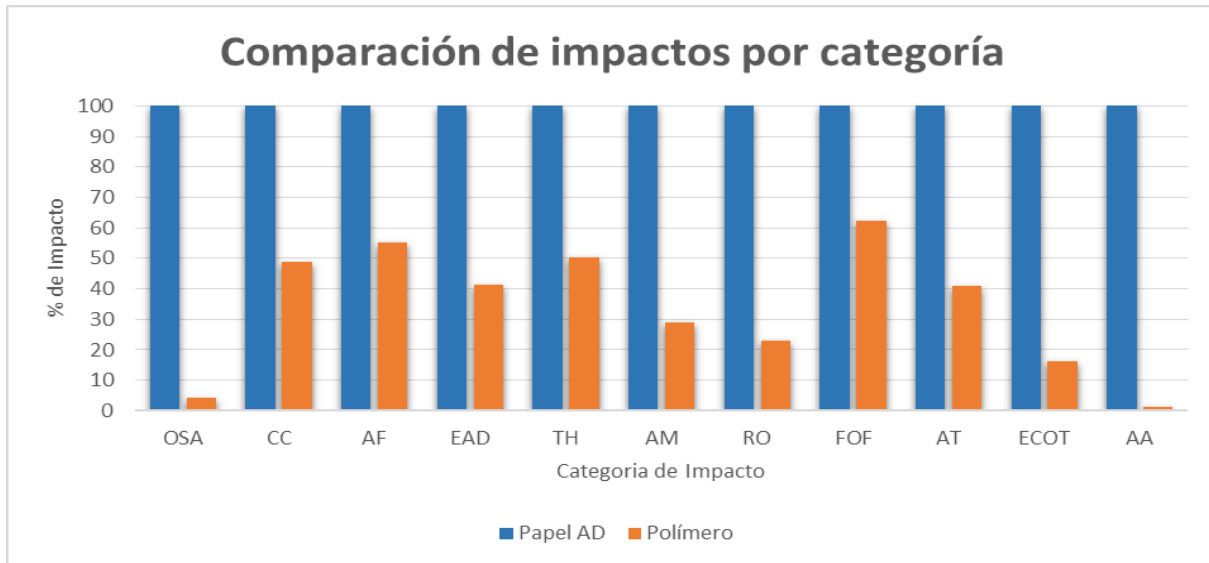


Figura 5.12 Impactos ambientales caracterizados de los dos sistemas analizados: papel AD y polímero.

AA Agotamiento de agua; **AF** Agotamiento de combustibles fósiles; **AM** Agotamiento de recursos minerales; **AT** Acidificación terrestre; **CC** Cambio climático; **ECOT** Ecotoxicidad terrestre; **EAD** Eutrofización de agua dulce; **TH** Toxicidad humana; **USA** Ocupación de suelo agrícola; **RO** Reducción ozono; **FOF** Formación de oxidantes fotoquímicos

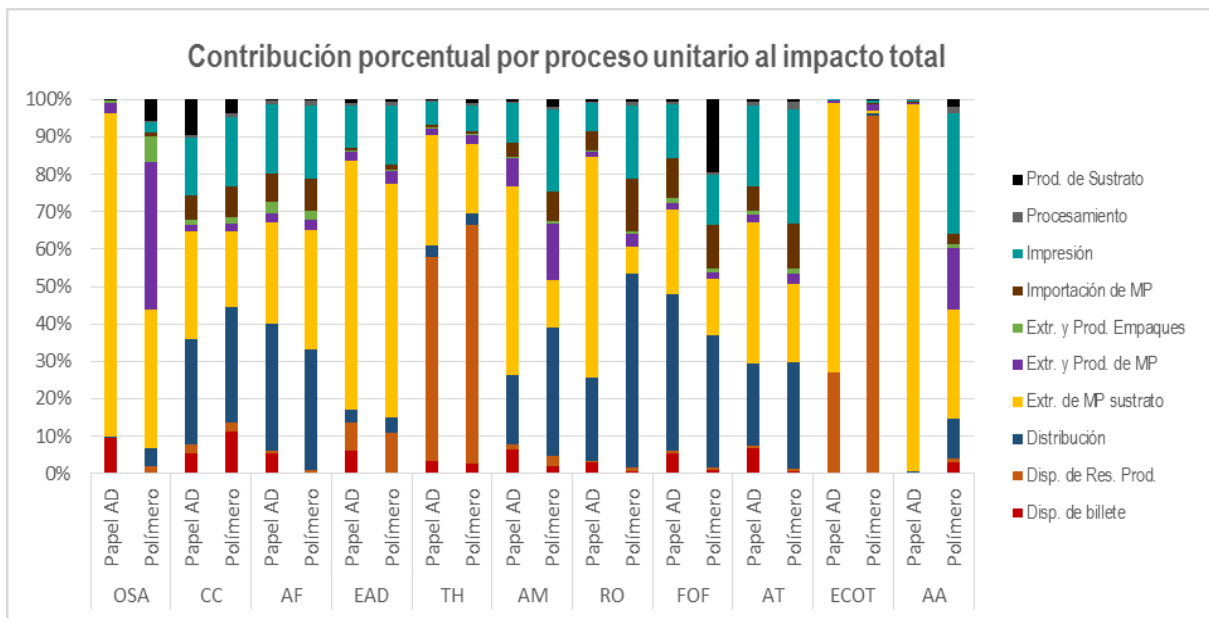


Figura 5.13 Contribución relativa de los procesos unitarios que conforman los escenarios papel AD y polímero

En las Tablas 5.2 y 5.3 se presentan los valores porcentuales en los que contribuye cada etapa de vida del billete impreso en los dos tipos de polímero a las categorías de impacto analizadas.

Tabla 5.2 Contribución porcentual por proceso unitario. Sustrato de papel AD

Categoría de impacto	Extr. de MP sustrato	Prod. de Sustrato	Extr. y Prod. de MP	Extr. y Prod. Empaques	Importación de MP	Impresión	Distribución	Procesamiento	Disp. de billete	Disp. de Res. Prod.
OSA	86.15%	0.10%	2.92%	0.52%	0.06%	0.21%	0.40%	0.01%	9.51%	0.13%
CC	28.52%	9.41%	1.72%	1.56%	6.43%	15.38%	28.39%	0.88%	5.55%	2.16%
AF	27.37%	0.25%	2.35%	2.94%	7.58%	18.54%	33.85%	1.06%	5.48%	0.59%
EAD	66.41%	1.02%	2.38%	0.38%	0.76%	11.29%	3.29%	0.65%	6.26%	7.56%
TH	29.48%	0.29%	1.81%	0.34%	0.62%	6.06%	2.97%	0.34%	3.47%	54.62%
AM	50.37%	0.43%	7.51%	0.49%	3.72%	10.67%	18.79%	0.34%	6.34%	1.34%
RO	58.72%	0.53%	1.39%	0.35%	5.12%	7.65%	22.49%	0.41%	2.94%	0.40%
FOF	22.68%	0.47%	1.77%	1.38%	10.65%	14.24%	41.83%	0.80%	5.37%	0.81%
AT	37.70%	0.42%	1.84%	1.06%	6.49%	21.70%	22.11%	1.24%	6.87%	0.56%
ECOT	72.06%	0.01%	0.50%	0.02%	0.04%	0.25%	0.20%	0.01%	0.28%	26.63%
AA	98.32%	0.03%	0.34%	0.02%	0.06%	0.65%	0.24%	0.04%	0.28%	0.02%

> 30%	20-30%	10-20%	< 10%
-------	--------	--------	-------

Tabla 5.3 Contribución porcentual por proceso unitario. Sustrato de polímero

Categoría de impacto	Extr. de MP sustrato	Prod. de Sustrato	Extr. y Prod. de MP	Extr. y Prod. Empaques	Importación de MP	Impresión	Distribución	Procesamiento	Disp. de billete	Disp. de Res. Prod.
OSA	37.05%	5.78%	39.54%	7.00%	1.00%	2.77%	4.84%	0.15%	0.18%	1.70%
CC	20.49%	3.75%	2.07%	1.58%	8.37%	18.31%	30.66%	1.05%	11.13%	2.59%
AF	31.95%	0.38%	2.50%	2.42%	8.77%	19.56%	32.39%	1.12%	0.29%	0.62%
EAD	62.39%	0.61%	3.37%	0.50%	1.31%	15.83%	4.20%	0.91%	0.18%	10.71%
TH	18.79%	1.04%	2.11%	0.39%	0.83%	7.00%	3.12%	0.39%	2.63%	63.71%
AM	12.69%	1.82%	15.15%	0.88%	7.90%	21.96%	34.28%	0.69%	1.93%	2.70%
RO	7.06%	0.63%	3.56%	0.69%	14.03%	19.45%	51.95%	1.05%	0.55%	1.03%
FOF	14.93%	19.30%	1.67%	1.06%	11.86%	13.33%	35.47%	0.75%	0.87%	0.76%
AT	20.96%	0.73%	2.63%	1.27%	12.05%	30.72%	28.39%	1.76%	0.69%	0.80%
ECOT	0.62%	0.10%	1.79%	0.09%	0.16%	0.89%	0.65%	0.05%	0.03%	95.62%
AA	29.42%	1.81%	16.43%	0.77%	2.98%	32.19%	10.50%	1.81%	3.01%	1.06%

> 30%	20-30%	10-20%	< 10%
-------	--------	--------	-------

En la Tabla 5.4 se muestran los impactos totales causados por los dos tipos de sustrato en cada una de las categorías de impacto seleccionadas.

Tabla 5.4 Impacto total generado por unidad funcional

Categoría de Impacto	Unidad	Impacto generado	
		Papel AD	Polímero
Cambio climático	kg CO ₂ -eq	2.87	1.40
Reducción de capa de ozono	kg CFC-11-eq	2.41E-07	5.51E-08
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg COVNM	0.0099	0.006
Acidificación terrestre	kg SO ₂ -eq	0.012	0.004
Toxicidad humana	kg 1,4-DCB-eq	1.24	0.62
Eutrofización de agua dulce	kg P-Eq	0.00071	0.00029
Eco toxicidad terrestre	kg 1,4-DCB-eq	0.024	0.003
Ocupación de suelo agrícola	m ² a	0.89	0.038
Agotamiento de agua	m ³	0.18	0.002
Agotamiento de recursos minerales	kg Fe-eq	0.06	0.017
Agotamiento de combustibles fósiles	kg petróleo-eq	0.81	0.44

Capítulo 6

6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los resultados obtenidos de la comparación entre sistemas dependen de los datos de entrada y por lo tanto es conveniente examinar estos datos de manera meticulosa. El análisis de sensibilidad puede enfocarse en aquellos datos de entrada que son más importantes para realizar una elección (Ríos Insúa, 1990).

El presente análisis de sensibilidad se realiza para estimar los efectos de uno o más factores sobre el resultado del estudio; en este caso se basa en dos aspectos: la consideración de diferentes tiempos de vida útil y la inclusión de los cajeros automáticos durante la etapa de uso de los billetes.

El primer análisis de sensibilidad consistió en variar el tiempo de vida de ambos sustratos, agregando dos escenarios para el papel AD y tres más para el sustrato de polímero, lo cual ha permitido analizar la relación entre el impacto ambiental generado por el ciclo de vida de los billetes respecto a los escenarios de tiempo de vida útil definidos.

El análisis de sensibilidad incluyendo cajeros automáticos incorpora la energía eléctrica consumida en el funcionamiento de los cajeros automáticos para abastecer de billetes a lo largo de todo el país durante la etapa de uso.

6.1 Análisis de sensibilidad variando tiempo de vida útil

Los resultados obtenidos del Análisis de Ciclo de Vida muestran que el tiempo de vida útil es una variable relevante que influye en el desempeño ambiental de los billetes mexicanos.

De acuerdo con esto, se realizó el análisis de sensibilidad variando el tiempo de vida útil de los billetes de ambos sustratos de acuerdo a la información definida por el Banco de México y que se presenta a continuación (Tabla 6.1):

- **Papel AD_31.5. Escenario base para el billete de papel de alta durabilidad.** Como escenario base para el billete de papel de alta durabilidad se ha considerado un tiempo de vida útil de 31.5 meses.
- **Papel AD_33.75.** Escenario considerando un tiempo de vida útil de 33.75 meses para el billete de papel de alta durabilidad.
- **Papel AD_40.5.** Escenario considerando un tiempo de vida útil de 40.5 meses para el billete de papel de alta durabilidad.
- **Polímero_54. Escenario base para el billete de polímero.** Como escenario base para el billete de polímero se ha considerado un tiempo de vida útil de 54 meses.
- **Polímero_33.75.** Escenario considerando un tiempo de vida útil de 33.75 meses para el billete de polímero.
- **Polímero_40.5.** Escenario considerando un tiempo de vida útil de 40.5 meses para el billete de polímero.
- **Polímero_47.25.** Escenario considerando un tiempo de vida útil de 47.25 meses para el billete de polímero.

Tabla 6.1 Tiempo de vida útil de los billetes papel AD y polímero establecidos para el análisis de sensibilidad

	Escenario base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Sustrato	Tiempo de vida útil (meses)			
Papel AD	31.5	33.75	40.5	-----
Total de billetes requeridos para la UF	121	113	94	-----
Polímero	54.0	33.75	40.5	47.25
Total de billetes requeridos para la UF	71	113	94	81

En la Figura 6.1 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad comparando el efecto de la variación en el tiempo de vida útil para ambos sustratos. Aquí se aprecia que el papel AD con tiempos de vida de 33.75 y 40.5 meses presenta una disminución en el impacto en todas las categorías analizadas respecto al escenario base (31.5 meses), lo cual se explica debido a que se requiere una menor cantidad de billetes para satisfacer la función que determina la unidad funcional y por lo tanto se reduce el impacto generado. El papel AD con 33.75 meses de vida útil alcanza reducciones de impactos que van del 5.4% al 5.9% y en el caso de que el tiempo de vida fuera de 40.5 meses la disminución de impacto alcanzaría valores entre el 21.4% y 22%.

Al hacer el análisis del billete de polímero comparando los escenarios 33.75, 40.5 y 47.25 meses, frente al escenario base (54 meses), se calculó que reducir el tiempo de vida útil del billete a 47.25 meses implicaría un potencial incremento en la carga ambiental de entre 2.2% y 13.8%, identificándose mayor incremento en las categorías ocupación de suelo agrícola y ecotoxicidad. El reducir a 40.5 meses el tiempo de vida del billete incrementaría la carga ambiental entre 24 y 32% presentando mayor incremento las categorías eutrofización de agua dulce y ocupación de suelo agrícola. Por otro lado disminuir el tiempo de vida de los billetes de polímero a 33.75 meses, representaría un aumento en el impacto ambiental de entre 41.4 y 61.5%, observándose mayor incremento en las categorías toxicidad humana y ocupación de suelo agrícola, lo cual se observa en la Figura 6.1. En la Tabla 6.2 se presentan las contribuciones de cada escenario en valores reales según la categoría.

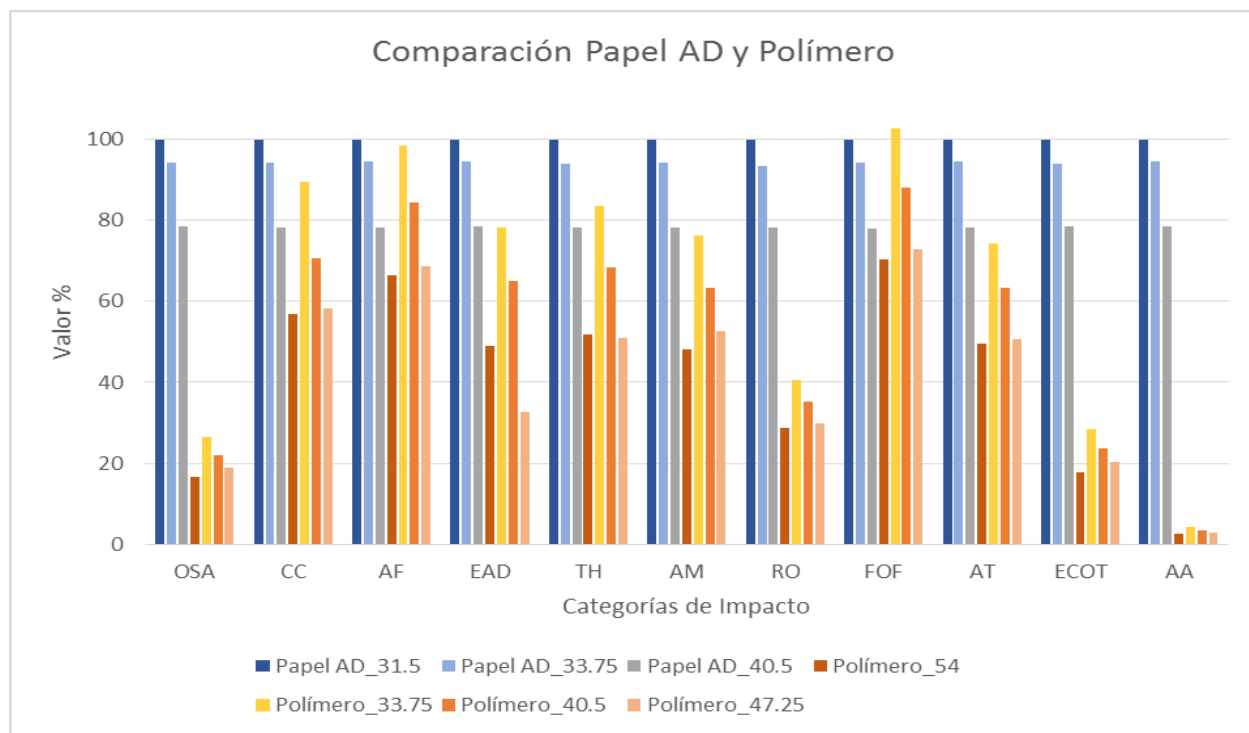


Figura 6.1 Comparación de los diferentes escenarios de tiempo de vida útil.

Categorías de impacto: OSA Ocupación de suelo agrícola; CC Cambio climático; AF Agotamiento de combustibles fósiles; EAD Eutrofización de Agua Dulce; TH Toxicidad humana; AM Agotamiento de recursos minerales; RO Reducción de capa de ozono; FOF Formación de oxidantes fotoquímicos; AT Acidificación terrestre; ECOT Ecotoxicidad terrestre; AA Agotamiento de agua.

Tabla 6.2 Contribución de los escenarios de vida útil a cada categoría de impacto en valores totales

Categoría de Impacto	Unidad	Papel AD_31.5	Papel AD_33.75	Papel AD_40.5	Polímero_54	Polímero_33.75	Polímero_40.5	Polímero_47.25
OSA	m ² a	8.73E-01	8.23E-01	6.86E-01	1.45E-01	2.32E-01	1.92E-01	1.64E-01
CC	kg CO ₂ -eq	2.87E+00	2.71E+00	2.24E+00	1.63E+00	2.57E+00	2.03E+00	1.67E+00
AF	kg petróleo-eq	8.12E-01	7.67E-01	6.34E-01	5.39E-01	8.01E-01	6.86E-01	5.58E-01
EAD	kg P-eq	7.33E-04	6.92E-04	5.76E-04	3.58E-04	5.73E-04	4.78E-04	2.39E-04
TH	1.4-DCB-eq	1.35E+00	1.27E+00	1.05E+00	6.97E-01	1.13E+00	9.20E-01	6.87E-01
AM	kg Fe-eq	6.96E-02	6.57E-02	5.45E-02	3.36E-02	5.31E-02	4.41E-02	3.66E-02
RO	kg CFC-eq	2.42E-07	2.27E-07	1.90E-07	6.95E-08	9.83E-08	8.56E-08	7.26E-08
FOF	kg COVNM	9.96E-03	9.40E-03	7.76E-03	7.00E-03	1.02E-02	8.78E-03	7.26E-03
AT	kg SO ₂ -eq	1.21E-02	1.15E-02	9.48E-03	6.00E-03	9.02E-03	7.67E-03	6.14E-03
ECOT	kg-1.4 DCB-eq	2.53E-02	2.38E-02	1.98E-02	4.52E-03	7.21E-03	6.00E-03	5.14E-03
AA	m ³	1.87E-01	1.77E-01	1.47E-01	4.89E-03	7.80E-03	6.44E-03	5.09E-03

De acuerdo con la Tabla 6.1, al disminuir la vida útil del billete de polímero aumenta la cantidad de billetes necesarios para satisfacer la función que determina la unidad funcional, por lo tanto aumenta el impacto asociado al ciclo de vida del billete de polímero, presentándose una tendencia de disminución de impacto conforme se aumenta el tiempo de vida útil en todas las categorías analizadas, tanto en la comparación de un solo tipo de sustrato como al momento de comparar los siete escenarios.

A continuación se comparan los dos sustratos y se discuten las categorías de agotamiento de recursos fósiles y formación de oxidantes fotoquímicos, en virtud de que se observó una diferencia significativa en su desempeño respecto al resto de las categorías analizadas en este análisis de sensibilidad.

En el análisis de sensibilidad comparando los dos sustratos con vida útil equivalente (33.75 y 40.5 meses), se observa que el polímero presenta mayor impacto en agotamiento de recursos fósiles y formación de oxidantes fotoquímicos que el papel AD, lo cual se aprecia en las Figuras 6.2 y 6.3.

La categoría de agotamiento de recursos fósiles se ve directamente afectada por la disminución de la vida útil del billete de polímero debido a que se necesita distribuir mayor cantidad de piezas para satisfacer la función del sistema lo cual implica un mayor gasto de combustible así como mayor cantidad de electricidad para producir más polipropileno y más tinta de recubrimiento (Figura 6.2).

La distribución del billete, la producción del polipropileno y la tinta de recubrimiento son los procesos que generan la mayor contribución del billete de polímero a la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos como lo son el O₃, SO₂ y NO₂, entre otros; por lo que la contribución aumenta significativamente con la disminución de la vida útil del billete (Figura 6.3).

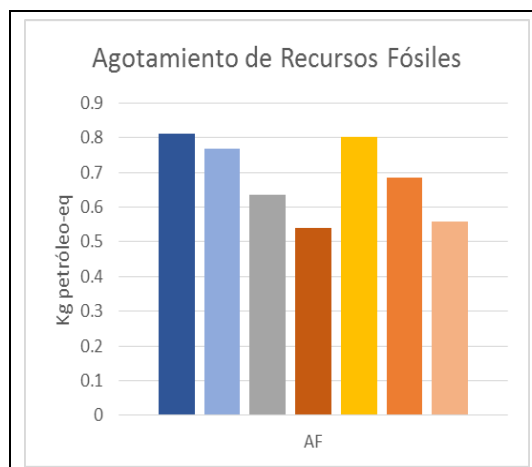


Figura 6.2 Contribuciones a la categoría de agotamiento de recursos fósiles, valores totales por escenario

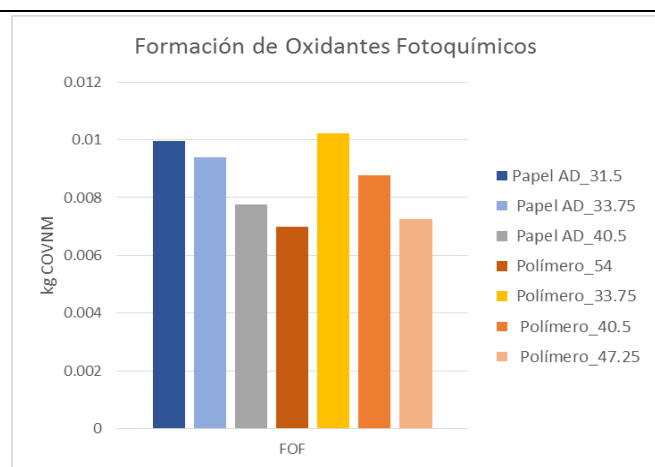


Figura 6.3 Contribuciones a la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos, valores totales por escenario

En la Figura 6.4, se aprecia que la diferencia en el impacto ambiental entre sustratos se reduce con un tiempo de vida útil igual tanto a 33.75 como a 40.5 meses, a excepción de las categorías agotamiento de combustibles fósiles y formación de oxidantes fotoquímicos (Figuras 6.2 y 6.3), en las que el polímero presenta mayor impacto que el papel AD, debido a que el billete de polímero emplea mayor cantidad de materias primas derivadas del petróleo que contribuyen directamente a estas categorías y que al igualar el tiempo de vida útil resulta menos eficiente el polímero que el papel AD.

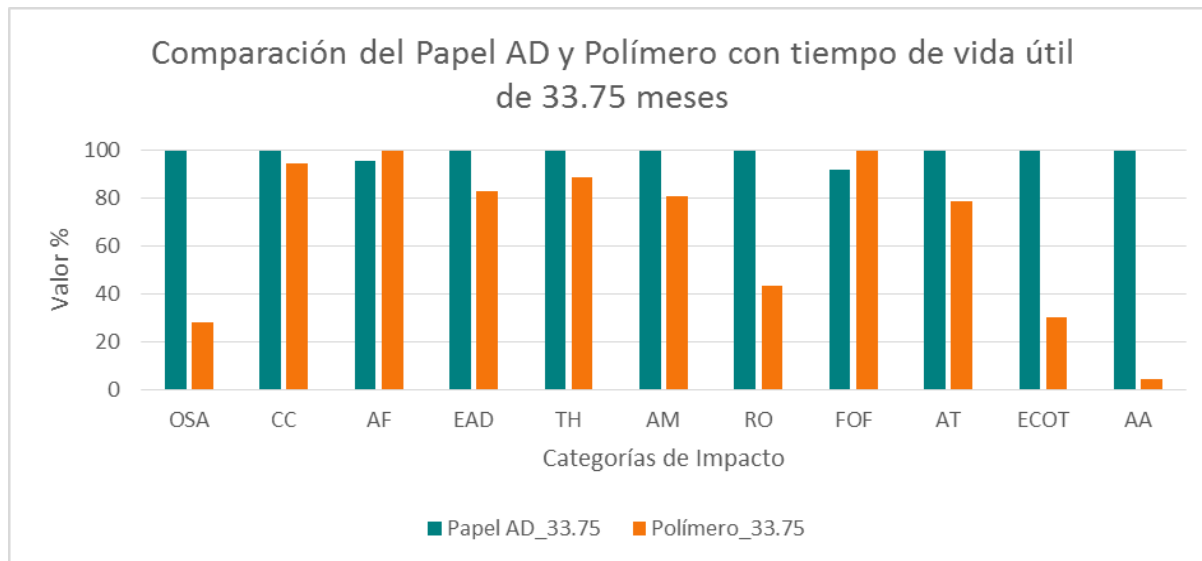


Figura 6.4 Comparación del Papel AD y Polímero con tiempo de vida útil 33.75 meses.

Categorías de impacto: OSA Ocupación de suelo agrícola; CC Cambio climático; AF Agotamiento de combustibles fósiles; EAD Eutrofización de Agua Dulce; TH Toxicidad humana; AM Agotamiento de recursos minerales; RO Reducción de capa de ozono; FOF Formación de oxidantes fotoquímicos; AT Acidificación terrestre; ECOT Ecotoxicidad terrestre; AA Agotamiento de agua.

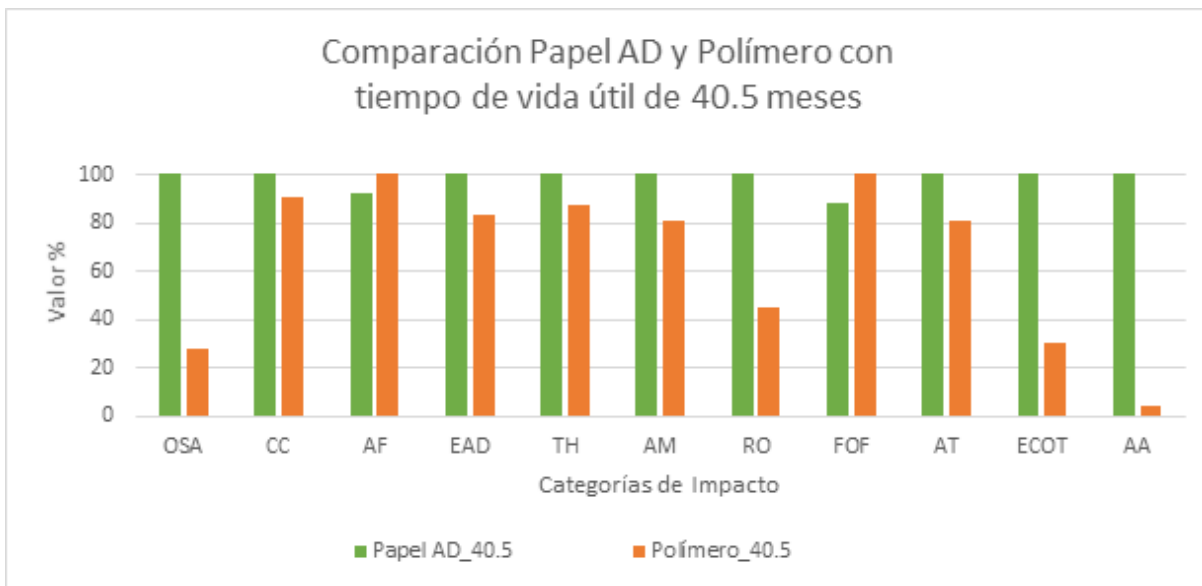


Figura 6.5 Comparación del Papel AD y Polímero con tiempo de vida útil 40.5 meses.

En la Figura 6.5 se muestra que respecto a la vida útil de 40.5 meses el billete de polímero causa un impacto mayor en las categorías de agotamiento fósil debido al combustible necesario para distribuir el billete, así como en la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos debido principalmente a las emisiones generadas tanto en el proceso de distribución como en la producción del polipropileno y de la tinta de recubrimiento. En nueve de las once categorías analizadas el polímero presenta una contribución menor a la del papel AD, presentándose una tendencia similar al tiempo de duración de 33.75 meses.

Se identificó que:

- Con tiempos de vida equivalentes para los dos tipos de sustrato, el polímero genera mayor impacto en las categorías agotamiento de combustibles fósiles y formación de oxidantes fotoquímicos que el papel AD, lo cual se debe al uso de combustibles fósiles para la fabricación del polímero y a la emisión de NO_x, O₃ y SO₂ durante el proceso petroquímico de fabricación del polímero, los cuales generan la formación de foto-oxidantes (O₃ troposférico).
- Las categorías de impacto en las que el polímero presenta un desempeño ambiental más bajo que el papel AD, están relacionadas con la producción y uso de materias primas derivadas del petróleo, lo cual se explica ya que en el billete de polímero los derivados del petróleo son el sustrato principal.
- El billete de papel AD presenta una reducción en todas las categorías de impacto analizadas en los escenarios (33.75 y 40.5 meses) el cual es proporcional al aumento en el tiempo de vida útil de este sustrato.
- Disminuir el tiempo de vida del billete de polímero incrementa las cargas al ambiente, habiendo un incremento significativo en éstas cargas en los escenarios 40.50 y 33.75 meses.
- Una vez en circulación los billetes tienen un desgaste continuo que depende de las condiciones de uso. En este aspecto México es un país que cuenta con una amplia variedad de climas dependiendo de la región, es por esto que el billete presenta un grado de desgaste asociado a las condiciones de clima y humedad a las que es sometido, variando significativamente su tiempo de vida útil. En este aspecto es de suma importancia para este estudio tomar en cuenta el promedio de vida útil del billete respecto a las condiciones climatológicas de México ya que puede presentar una variación importante respecto a los resultados obtenidos en otros países.

6.2 Análisis de sensibilidad incluyendo cajeros automáticos

Este análisis de sensibilidad considera el impacto ambiental asociado a la electricidad necesaria para el funcionamiento de ATM (*Automated Teller Machine, ATM*) para distribución de billetes durante la etapa de uso.

Para llevar a cabo el análisis se tomaron en consideración los datos proporcionados por los principales bancos del país: BBVA Bancomer, Banamex, Banorte, HSBC, Scotiabank y Santander, lo cual conforme a los datos proporcionados por el Banco de México representa el 87.6% de la totalidad de los cajeros en funcionamiento en México para el año 2013. El gasto de energía eléctrica se determinó con base en la

unidad funcional, de acuerdo a las características de un cajero automático marca Diebold modelo Opteva 522 para la totalidad de los cajeros analizados, debido a que de acuerdo a los datos proporcionados es uno de los equipos más utilizados por los bancos comerciales incluidos en este estudio (Tabla 6.3). Los datos utilizados para este análisis de sensibilidad son clasificados de acuerdo al apartado 3.7 del presente documento como datos secundarios, debido a que han sido proporcionados por los bancos comerciales antes mencionados.

Los cajeros automáticos consumen energía tanto cuando expiden efectivo ó modo activo, como cuando se encuentran en modo inactivo. El tipo de cajero automático analizado contiene cinco casetes los cuales tienen una capacidad de 2,500 billetes cada uno, lo cual proporciona una capacidad total de 12,500 billetes en cada cajero automático (Diebold, 2015).

Con los datos relativos al año 2013 proporcionados por los 6 bancos antes mencionados, se calculó un total de 32,383 cajeros automáticos a lo largo de todo el país, un total de 824,485,141 billetes retirados al mes y 1,551,886,966 transacciones realizadas al año. Con estos datos se determinó que cada cajero realiza 131 transacciones por día con duración de un minuto. Por cada transacción se expiden un promedio de 6 billetes, lo que representa un total de 2.18 horas en modo activo y 21.82 horas en modo inactivo, asumiendo que los cajeros se encuentran en funcionamiento las 24 horas del día (CNBV, 2013).

Cada billete posee un gasto de energía asociado, tanto en el tiempo de operación activa del cajero, como al tiempo en el que permanece inactivo, por lo que la suma de estos consumos debe ser repartida entre todos los billetes contenidos en el cajero durante un periodo de tiempo determinado. Con base en los datos antes mencionados se consideró un ciclo de abastecimiento de 16 días. De esta manera se calculó la cantidad de energía, expresada en kWh, asociada a la distribución de la unidad funcional en la etapa de uso del billete. En la Tabla 6.3 se presentan los datos utilizados en la etapa de uso del billete. Para la realización de este análisis se considera el Mix Eléctrico de México (SENER, 2013): termoeléctrica 70%, hidroeléctrica 10.5%, carboeléctrica 6%, gas natural 6%, geotérmica 2%, nucleoelectrica 4.5% y eólica 1%.

Tabla 6.3 Datos asociados a la etapa de uso del billete

Parámetro	Modo activo (kWh/ transacción)	Modo inactivo (kWh/ ATM.día)	Total por billete (kWh/ciclo ¹)	kWh /UF		Módulo
				Papel AD	Polímero	
ATM's						
Electricidad	0.0038	3.27	0.0048	66.68	39.13	Electricidad de bajo voltaje, mix [MX]

¹ Suma de energía consumida en estado activo más estado inactivo por billete, durante los 16 días del ciclo de abastecimiento.

En la Figura 6.6 se muestra en valores porcentuales, los impactos generados por los dos tipos de sustrato, incluyendo el consumo eléctrico de los cajeros automáticos para las once categorías analizadas. Se realizó una normalización de los resultados para realizar el análisis comparativo global entre los sistemas del estudio. Se puede observar que el sustrato de polímero, aun incluyendo el consumo de energía eléctrica en la etapa de uso, reduce el impacto ejercido al ambiente desde un 75.1% en la categoría de ocupación de suelo agrícola, hasta un 40.6% en formación de oxidantes fotoquímicos, con respecto al sustrato papel AD. En la Tabla 6.4 se presentan las contribuciones de cada escenario en valores reales según la categoría.

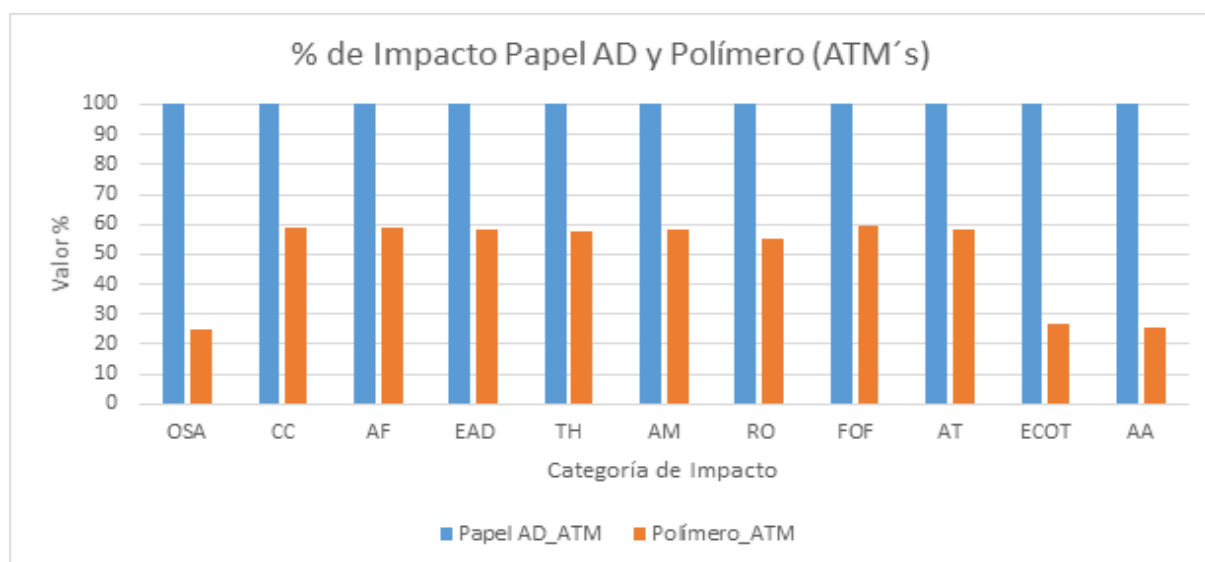


Figura 6.6 Contribución de ambos sustratos a cada categoría de impacto, incluyendo cajeros automáticos.

Categorías de Impacto: OSA Ocupación de suelo agrícola; CC Cambio climático; AF Agotamiento de combustibles fósiles; EAD Eutrofización de Agua Dulce; TH Toxicidad humana; AM Agotamiento de recursos minerales; RO Reducción de capa de ozono; FOF Formación de oxidantes fotoquímicos; AT Acidificación terrestre; ECOT Ecotoxicidad terrestre; AA Agotamiento de agua.

Tabla 6.4 Contribución de los escenarios ATM a cada categoría de impacto en valores totales

Categoría de Impacto	Unidad	Papel AD_ATM	Polímero_ATM
OSA	m ² a	1.088	0.271
CC	kg CO ₂ -eq	51.371	30.097
AF	kg petróleo-eq	16.854	9.953
EAD	kg P-eq	0.011	0.006
TH	1.4-DCB-eq	12.561	7.278
AM	kg Fe-eq	1.264	0.734
RO	kg CFC-eq	2.13E-06	1.17E-06
FOF	kg COVNM	0.159	0.095
AT	kg SO ₂ -eq	0.294	0.172
ECOT	kg-1.4 DCB-eq	0.032	0.009
AA	m ³	0.317	0.082

En la Figura 6.7 se muestra el impacto generado por cada etapa del ciclo de vida del billete en forma comparativa entre los sistemas de estudio. Se puede apreciar cómo la inclusión de la energía eléctrica utilizada por los cajeros automáticos genera el mayor impacto en la mayoría de las categorías para ambos billetes, seguida de etapa de extracción de materia prima para sustrato y la disposición de residuos de producción.

Dentro de las categorías en las cuales el uso de cajeros automáticos tiene un menor grado de contribución se encuentra la ocupación de suelo agrícola, debido a que para la generación de electricidad no es necesaria una gran extensión de terreno como lo es para el cultivo del algodón. En la categoría de agotamiento de agua se puede apreciar que el uso de agua para la producción de energía eléctrica es bastante considerable, sin embargo, en el caso del papel AD, el agua necesaria para el cultivo de algodón es aún mayor. Se encuentra también la categoría de ecotoxicidad terrestre en la cual destaca la etapa de extracción de materia prima para sustrato debido al uso de fertilizantes y plaguicidas en el cultivo del algodón, de igual manera se aprecia la disposición final de residuos de producción, dentro de los cuales se encuentra los residuos peligrosos generados en esta etapa.

En la Tabla 6.4 se presentan las etapas de mayor contribución a cada categoría en cantidades reales, así como el valor total de contribución por tipo de sustrato.

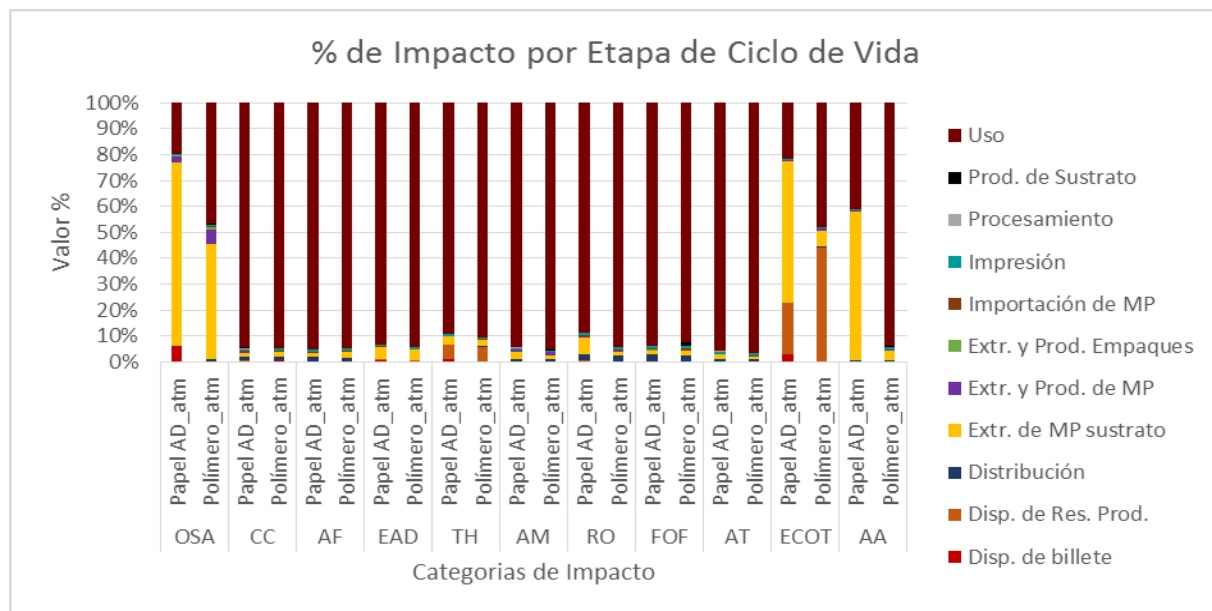


Figura 6.7 Porcentaje de impacto por etapa de ciclo de vida, incluyendo ATM's

Tabla 6.5 Etapas de mayor impacto en cada categoría, incluyendo ATM's

Categoría de Impacto		Unidad	Etapas de ciclo de vida	Valores reales papel AD	Valores reales polímero
OSA	Uso de suelo agrícola	m ² a	Extr. de MP sustrato	0.7689	0.1210
			Uso	0.2152	0.1263
			Total	1.0880	0.2713
CC	Cambio climático	kg CO ₂ -eq	Uso	48.5003	28.4616
			Extr. de MP sustrato	0.8199	0.4932
			Total	51.3711	30.0965
AF	Agotamiento fósil	kg petróleo-eq	Uso	16.0427	9.4144
			Extr. de MP sustrato	0.2232	0.2243
			Total	16.8544	9.9532
EAD	Eutrofización de agua dulce	kg P-eq	Uso	0.0100	0.0059
			Extr. de MP sustrato	4.74E-04	2.42E-04
			Total	0.0107	0.0062
TH	Toxicidad humana	1.4 DCB-eq	Uso	11.2151	6.5814
			Disp. de RP	0.6834	0.4012
			Extr. de MP sustrato	0.3683	0.1782
			Total	12.5610	7.2779
AM	Agotamiento de recursos minerales	kg Fe-eq	Uso	1.1942	0.7008
			Extr. de MP sustrato	0.0309	0.0129
			Total	1.2638	0.7344
RO	Reducción de capa de ozono	kg CFC-eq	Uso	1.88E-06	1.11E-06
			Extr. de MP sustrato	1.42E-07	1.72E-08
			Total	2.13E-06	1.17E-06
FOF	Formación de oxidantes fotoquímicos	kg COVNM	Uso	0.1492	0.0875
			Distribución	0.0042	0.0022
			Extr. de MP sustrato	0.0023	0.0017
			Total	0.1591	0.0945
AT	Acidificación terrestre	kg SO ₂ -eq	Uso	0.2822	0.1656
			Extr. de MP sustrato	0.0045	0.0019
			Total	0.2943	0.1716
ECOT	Ecotoxicidad terrestre	kg 1.4 DCB-eq	Extr. de MP sustrato	0.0176	0.0005
			Uso	0.0070	0.0041
			Disp. de RP	0.0065	0.0038
			Total	0.0323	0.0087
AA	Agotamiento de agua	m ³	Uso	0.1306	0.0767
			Extr. de MP sustrato	0.1833	0.0032
			Total	0.3173	0.0815

A continuación se presentan a detalle las categorías de mayor interés debido a la variación presentada en este estudio de sensibilidad.

6.2.1 Cambio climático

Los resultados globales de la categoría de cambio climático se presentan en la Figura 6.8, la cual muestra claramente los resultados al integrar el consumo de energía eléctrica por el uso de los cajeros automáticos. Este consumo de energía representa el 94.4% del impacto total generado por el papel AD con 48.5 kg CO₂-eq y el 94.6% en el billete de polímero con 28.4 kg CO₂-eq. Este resultado se debe a los GEI producidos en el proceso de generación de energía eléctrica con base al mix eléctrico de México.

En el escenario con la inclusión del uso de cajeros automáticos el uso del billete de polímero genera un ahorro en la producción de GEI de 20.1 kg CO₂-eq por unidad funcional, lo cual equivale a una reducción del 41.4% de emisiones, respecto al papel AD. Los resultados obtenidos coinciden con el estudio hecho por el Banco de Inglaterra (2013).

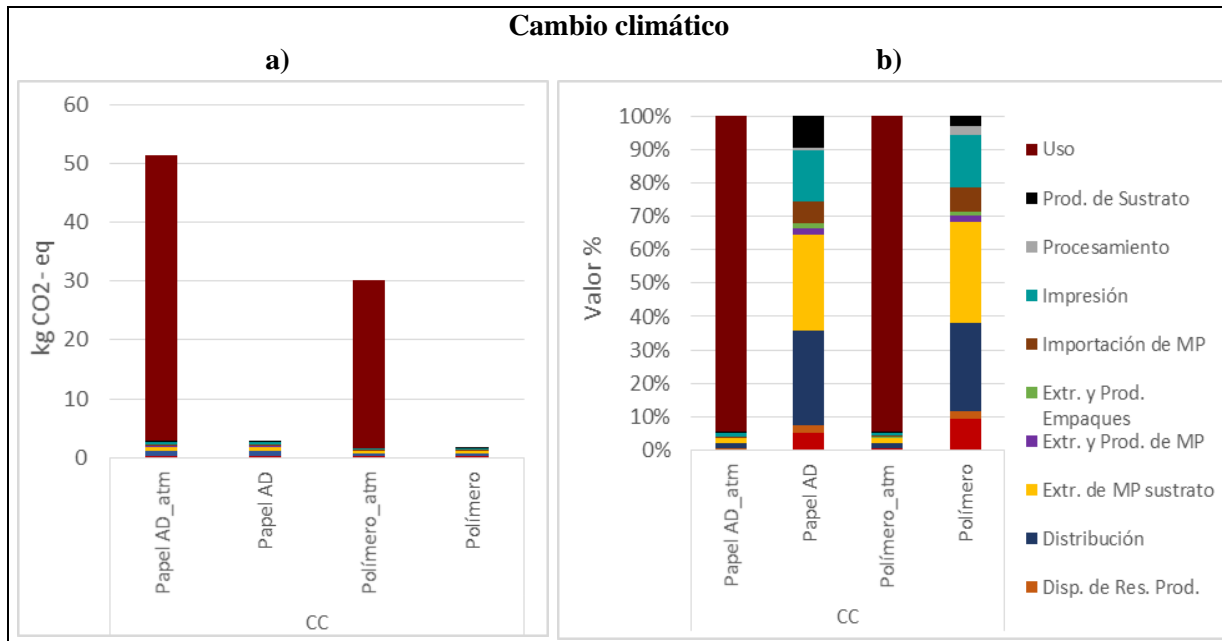


Figura 6.8 Contribuciones a la categoría de cambio climático, a) Valores totales por escenario, b) Valor porcentual por escenario.

6.2.2 Agotamiento de combustibles fósiles

En la categoría de agotamiento de combustibles fósiles presentados en la Figura 6.9, se puede apreciar que al integrar los datos del uso de cajeros automáticos, el impacto generado por la etapa de uso del billete representa un 95.2% para el papel AD, lo cual equivale a 16.0 kg petróleo-eq y un 94.6% para el sustrato de polímero, equivalente a 9.4 kg petróleo-eq. Este resultado se debe a los combustibles fósiles utilizados en el proceso de generación de energía eléctrica con base al mix eléctrico de México.

En el escenario que incluye el uso de cajeros automáticos el billete de polímero genera un ahorro de 6.6 kg petróleo-eq por unidad funcional, lo cual equivale a una reducción del impacto de 41.2%, respecto al papel AD. Los resultados obtenidos coinciden con el estudio hecho por el Banco de Inglaterra (2013).

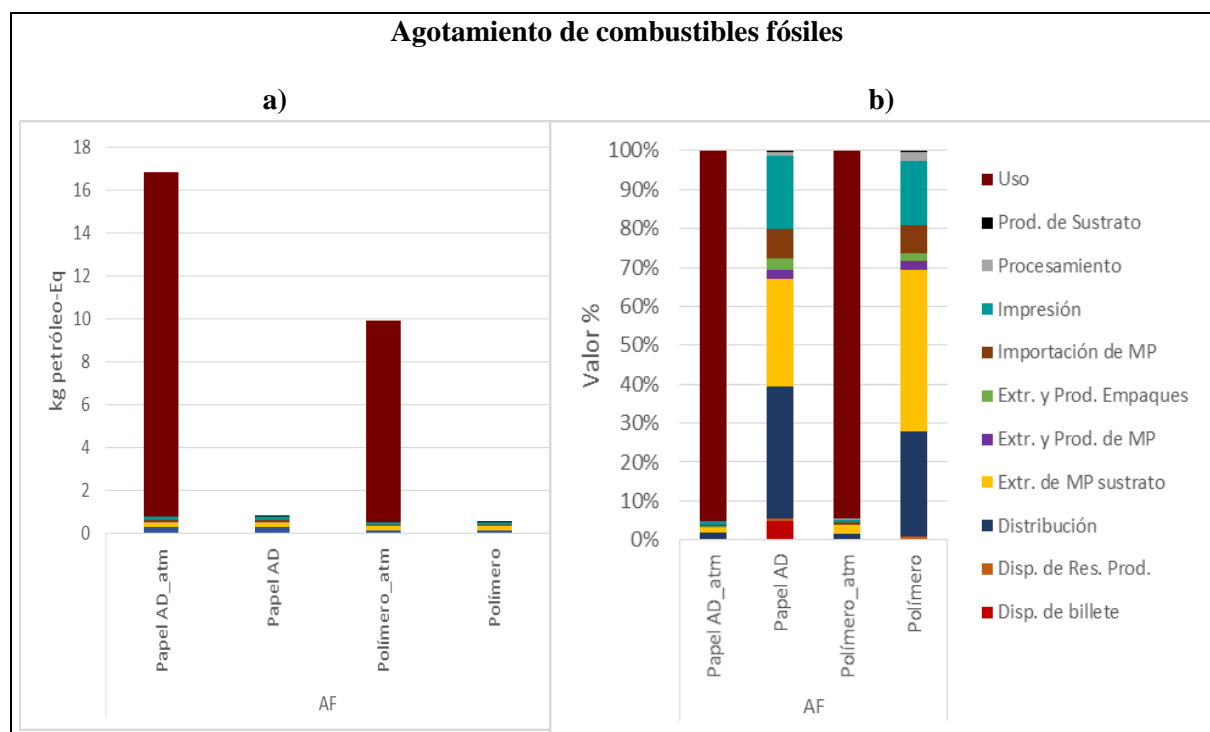


Figura 6.9 Contribuciones a la categoría de agotamiento de combustibles fósiles, a) Valores totales por escenario, b) Valor porcentual por escenario.

6.2.3 Agotamiento de recursos minerales

Los resultados obtenidos en la categoría de agotamiento de recursos minerales se presentan en la Figura 6.10, en la cual se observa que el impacto generado por el uso de cajeros automáticos representa el 94.5% para el billete de papel AD, que equivalen a 1.19 kg Fe-eq y el 95.4% para el sustrato de polímero correspondiente a 0.70 kg Fe-eq.

En el escenario con la inclusión del uso de cajeros automáticos, el uso del billete de polímero genera un ahorro de 0.49 kg Fe-eq por unidad funcional, lo cual equivale a una reducción del 41.1%, con relación al papel AD.

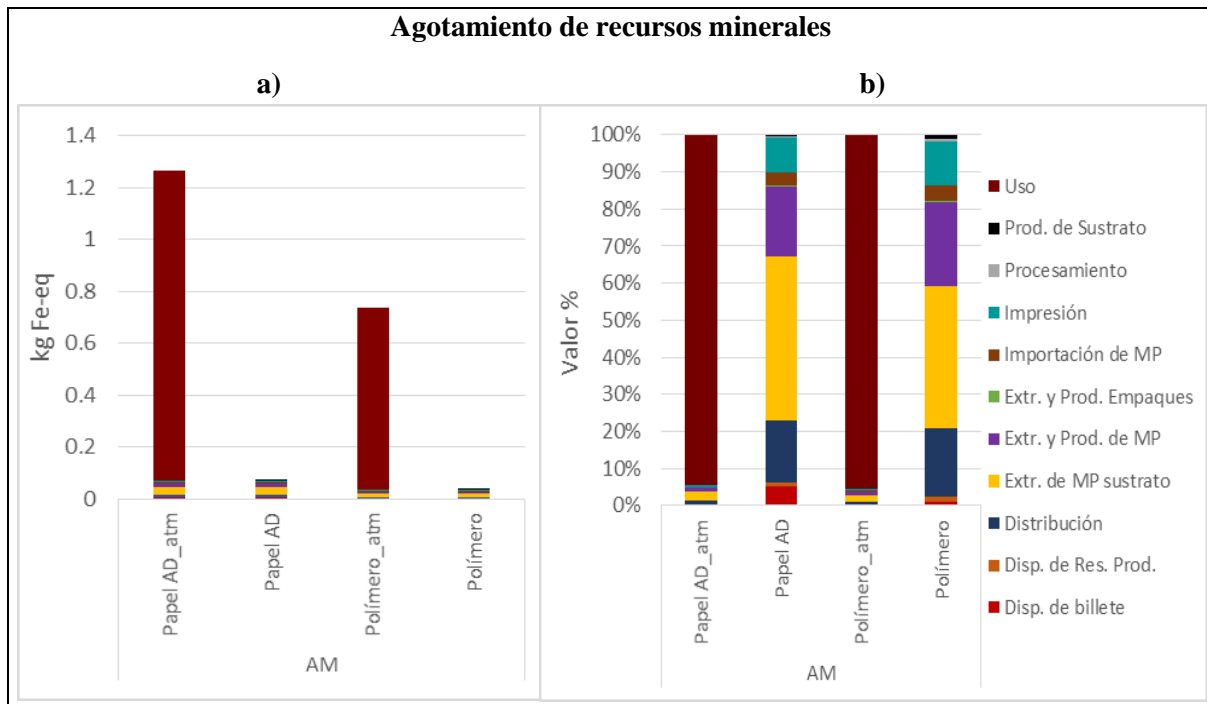


Figura 6.10 Contribuciones a la categoría de agotamiento de recursos minerales, a) Valores totales por escenario, b) Valor porcentual por escenario.

6.2.4 Ocupación de suelo agrícola

Los resultados del impacto asociado a la ocupación de suelo agrícola se presentan en la Figura 6.11, donde se puede observar que esta categoría es menos sensible a la inclusión de los datos de uso de energía eléctrica para el funcionamiento de los cajeros automáticos debido a que no existe un alto índice de ocupación de suelo para la generación de electricidad.

En el caso del papel AD el impacto por la inclusión de los cajeros automáticos aumentó 0.21 m²a equivalente a un porcentaje global de 19.8% y 70.7% para la etapa de extracción de materia prima para el sustrato, lo cual corresponde a 0.77 m²a, debido a la cosecha y producción de la fibra de algodón.

Para el billete de polímero la etapa de extracción de materia prima para el sustrato representa el 44.6% del uso de suelo y el uso de cajeros automáticos genera una ocupación de suelo de 46.5% equivalente a 0.12 m²a para ambos casos.

El uso del billete de polímero genera un ahorro de 0.81 m²a respecto al papel AD lo cual representa un 75.1% de ahorro en ocupación de suelo agrícola, debido principalmente a que se elimina la necesidad de grandes extensiones de suelo para la cosecha y producción del algodón.

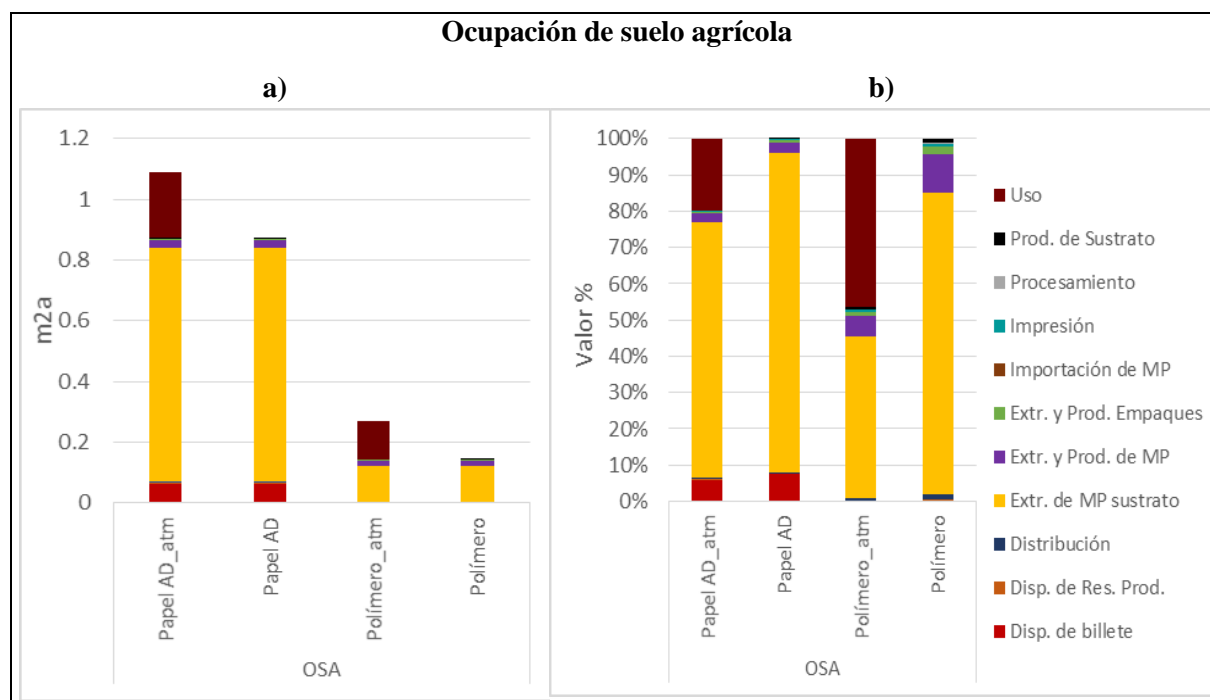


Figura 6.11 Contribuciones a la categoría de ocupación de suelo agrícola, a) Valores totales por escenario, b) Valor porcentual por escenario.

6.2.5 Ecotoxicidad terrestre

El consumo de energía eléctrica a causa del funcionamiento de cajeros automáticos genera un aumento moderado en el impacto a la categoría de ecotoxicidad terrestre, para el caso del papel AD el impacto de la etapa de uso representa un impacto de 21.8%, la extracción de materia prima para el sustrato debido al uso de fertilizantes durante la cosecha del algodón genera un impacto de 54.5% y la disposición de residuos de la producción el 20.2% del impacto global (Figura 6.12).

En el caso del sustrato de polímero el uso de cajeros automáticos representa el 47.8% de las emisiones contribuyentes a la ecotoxicidad terrestre, seguido de la disposición de residuos de la producción con 44.2%.

Destaca la etapa de extracción de materia prima para sustrato debido al uso de fertilizantes y plaguicidas en la cosecha del algodón, de igual manera se aprecia la disposición final de residuos de producción, dentro de los cuales se encuentra los residuos peligrosos generados en esta etapa y el uso de la energía eléctrica necesaria para la distribución del billete mediante cajeros automáticos.

En impactos globales con el uso del billete de polímero el impacto en la categoría de ecotoxicidad terrestre disminuye en un 73.2% por unidad funcional. Los resultados obtenidos coinciden con el estudio hecho por el Banco de Inglaterra (2013).

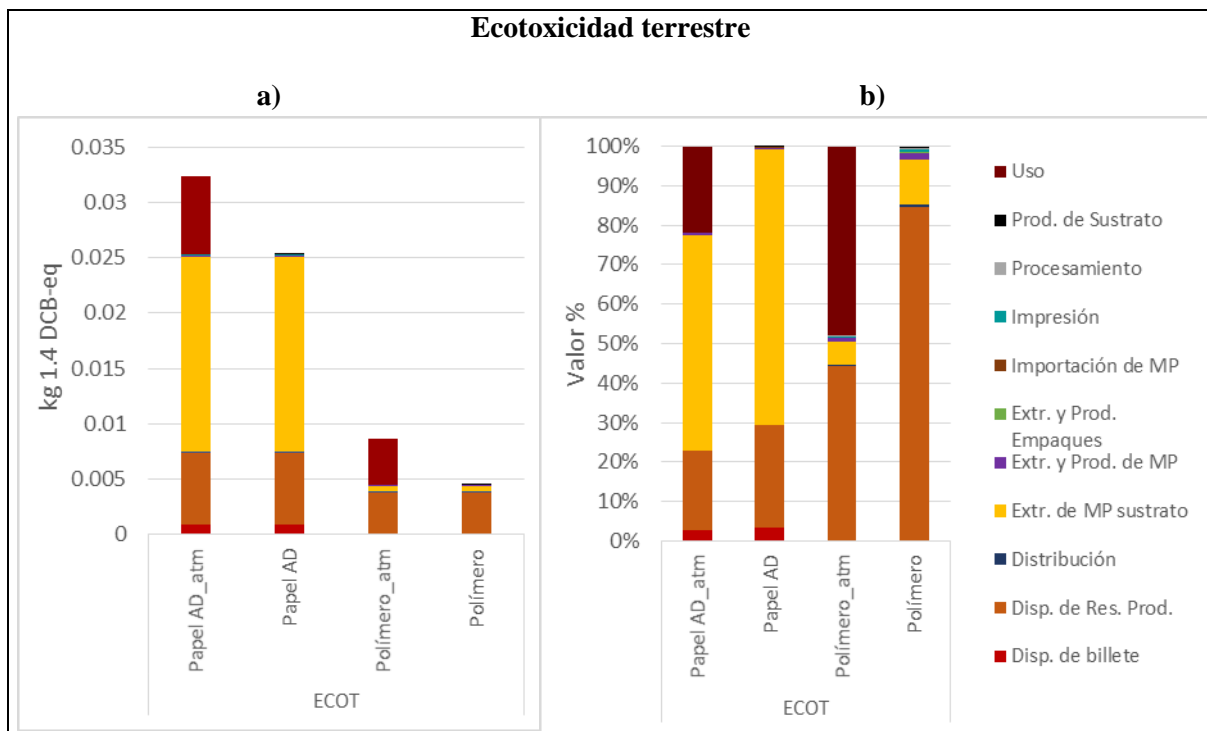


Figura 6.12 Contribuciones a la categoría de ecotoxicidad terrestre, a) Valores totales por escenario, b) Valor porcentual por escenario.

6.2.6 Agotamiento de agua

La categoría de agotamiento de agua recibe un incremento en el impacto generado por el uso de los cajeros automáticos debido a que según el mix eléctrico de México un 10.5% del total de la energía eléctrica es generada por actividades hidroeléctricas.

Por esta razón el papel AD genera un 41.2% del impacto a la categoría de agotamiento de agua por el uso de cajeros automáticos y un 57.8% en la extracción de materias primas para el sustrato derivadas de la cosecha y producción de la fibra de algodón. Respecto al sustrato de polímero el impacto generado en la etapa de uso es de un 94% por el uso de energía y de 4% en la extracción de materias primas para el sustrato (Figura 6.13).

Con el uso del billete de polímero el impacto en la categoría de agotamiento de agua se reduce en un 74.3% respecto al papel AD lo equivalente a 0.23 m³ por unidad funcional.

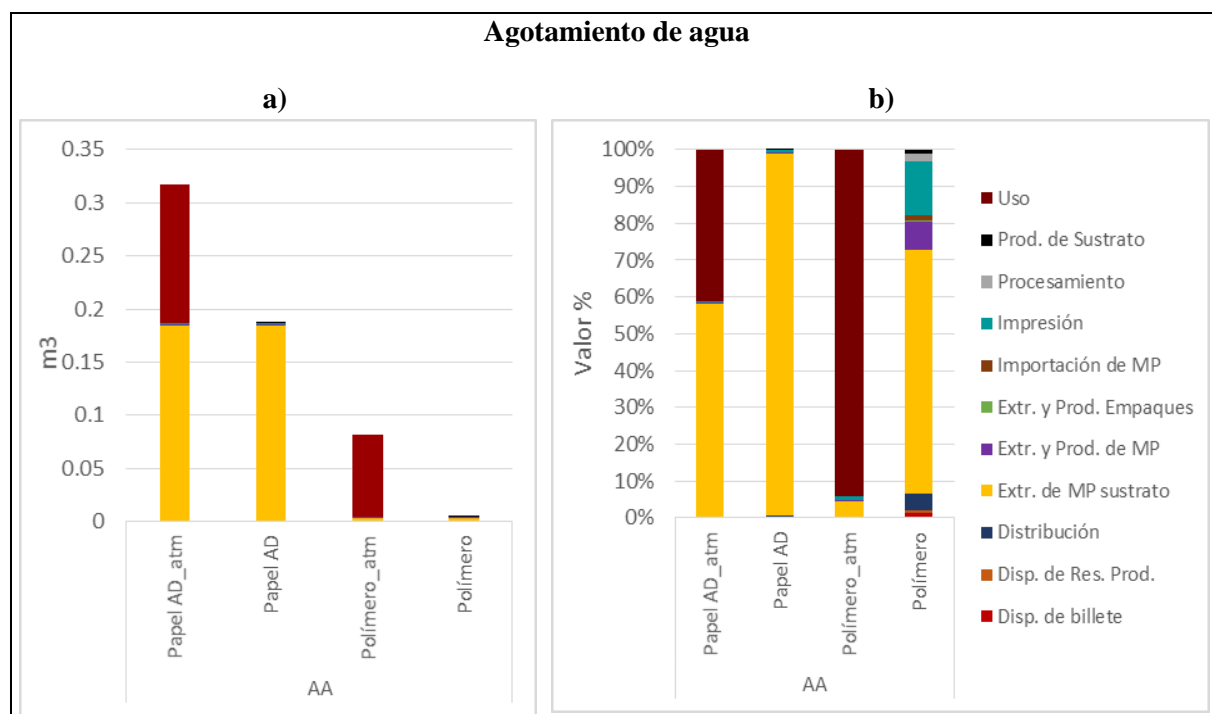


Figura 6.13 Contribuciones a la categoría de agotamiento de agua, a) Valores totales por escenario, b) Valor porcentual por escenario.

Se identificó que:

- El uso de cajeros automáticos genera un impacto significativo en la totalidad de las categorías de impacto.
- En ocho de las once categorías de impacto analizadas la fase de uso se convierte en la etapa de mayor contribución para ambos sustratos.
- En las categorías de ocupación de suelo agrícola, ecotoxicidad terrestre y agotamiento de agua, la inclusión de electricidad para el funcionamiento de los cajeros automáticos no genera la mayor contribución debido a que son categorías que se relacionan en menor manera con la generación de electricidad.

Capítulo 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida permiten identificar los contribuyentes principales a las categorías de impacto evaluadas, es así que en la totalidad de las categorías analizadas, el billete impreso en polímero presenta un mejor desempeño ambiental que el papel AD. La categoría en la que se observa menor diferencia entre los sistemas evaluados es la formación de oxidantes fotoquímicos con 37.9% y en la que existe mayor diferencia es el agotamiento de agua con 98.8%. Por lo que se concluye que el uso de polímero en la fabricación de billetes representa un ahorro de emisiones contaminantes al ambiente y de agotamiento de recursos naturales.

Con relación al papel AD, las etapas de ciclo de vida que generan un mayor impacto en 8 de las 11 categorías evaluadas son la extracción de materias primas y la fabricación de sustrato con una contribución que va desde 30% hasta 98%, así como la distribución del billete en las categorías de agotamiento de recursos fósiles y formación de oxidantes fotoquímicos con 33.85% y 41.83%, respectivamente. En general la extracción del algodón para la fabricación del papel AD presenta un impacto dominante en el ciclo de vida del billete.

En lo correspondiente al sustrato de polímero la distribución del billete por el territorio nacional tiene un mayor impacto en 5 categorías, con al menos 30% del impacto total, seguido de la extracción de materias primas para la producción del sustrato en las categorías de eutrofización de agua dulce, ocupación de suelo agrícola y agotamiento de recursos fósiles con 62.39%, 37.05% y 31.95%, respectivamente.

Los resultados anteriores se explican debido a que el billete impreso en sustrato de polímero presenta una vida útil mayor al billete de papel AD, por lo tanto se necesitan menos materias primas, se fabrican menos billetes, se distribuyen en menor cantidad y generan menos residuos.

El ACV permite identificar los contribuyentes de mayor peso a lo largo del ciclo de vida de un producto, por lo que en los resultados obtenidos se observa que los contribuyentes principales a las categorías de impacto son el sustrato, especialmente en el papel AD y la distribución del billete en los dos sistemas evaluados.

En el proceso de disposición del billete al final de la vida útil, en 10 de las 11 categorías se obtuvo que el papel AD genera un impacto mayor con hasta 50%, sin embargo, en la categoría de cambio climático el efecto que generan los dos sustratos en el relleno sanitario, es muy similar, con 0.159 kg de CO₂ eq para el papel AD y 0.156 kg de CO₂ eq para el polímero, siendo el impacto generado por el billete de polímero ligeramente menor al papel AD.

Respecto al proceso de impresión, se encontró que la categoría en la que genera mayor impacto es cambio climático, el cual logra reducirse en 56.8 % con la fabricación del billete en sustrato de polímero.

Los resultados indican que el impacto generado por la etapa de procesamiento de billete de los dos sistemas evaluados, no es significativo, ya que representa menos del 2% del impacto total.

En relación con el análisis de sensibilidad variando tiempos de vida respecto a las condiciones climatológicas de México a las cuales se encuentra expuesto el billete durante la etapa de circulación, el papel AD representa mayor impacto que el polímero bajo tiempos de vida iguales. En los escenarios de 33.75 y 40.5 meses, el papel AD tiene una mayor contribución en 9 de las 11 categorías de impacto, con excepción de agotamiento de combustibles fósiles y formación de oxidantes fotoquímicos.

Respecto a la inclusión del uso de cajeros automáticos en la etapa de uso del billete, los resultados indican que el impacto ejercido por el consumo de energía eléctrica es de gran relevancia en todas las categorías analizadas generando más del 90% del impacto en ocho categorías para ambos sustratos y alrededor del 20 y 50% para las categorías de ocupación de suelo agrícola, ecotoxicidad terrestre y agotamiento de agua, en las cuales la extracción de materias primas para sustrato presenta mayor contribución con al menos 50% del impacto total.

De manera general se observa que el polímero genera menor impacto ambiental y a su vez es importante buscar la manera de aumentar la vida útil de los billetes para reducir el impacto ejercido por los mismos. Desde el aspecto ambiental es recomendable imprimir otras denominaciones en sustrato de polímero.

Con el presente estudio se ha encontrado que la vida media del billete es fundamental en la generación de impacto ambiental. En este sentido se recomienda que el banco busque estrategias para aumentar la durabilidad de sus billetes, como nuevos materiales y recubrimientos, tanto en lo referente al tipo de sustrato como al tipo de impresión y tintas utilizadas en este proceso.

El uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida en el sector industrial permite obtener una perspectiva holística del impacto ambiental generado en las diversas categorías de impacto, lo que facilita la identificación de áreas de oportunidad y la toma de decisiones, como en el presente caso, la selección e incorporación de nuevos materiales en productos de destacada importancia como son los billetes mexicanos.

7.2 Recomendaciones

Es recomendable analizar la cadena de proveedores de Banco de México, buscando aquellos productos derivados de procesos sustentables y que contribuyan a aumentar la vida útil de los billetes.

En la etapa de uso del billete considerando los cajeros automáticos, se presenta un fuerte impacto derivado del consumo de electricidad que va relacionado en forma directa con el mix eléctrico de México, para lo cual sería sumamente conveniente la futura incorporación de energías alternas y renovables en mayor porcentaje para la producción de este insumo. Se recomienda que el Banco de México solicite la implementación de tecnologías de generación de energía más limpias, así como buscar estrategias encaminadas a maximizar el aprovechamiento de la energía eléctrica consumida por los cajeros automáticos, ya sea mediante equipos de menor consumo eléctrico, dispositivos de ahorro eléctrico o una logística y distribución de cajeros automáticos que permitan disminuir el tiempo que estos permanecen en estado de inactividad.

Se recomienda el análisis de otras estrategias de disposición final que contribuyan a la ecoeficiencia del sistema, es decir, crear más bienes y servicios utilizando la menor cantidad de recursos y generando menos residuos, lo cual conlleva una mayor durabilidad de los productos. Así como también se recomienda analizar estrategias de distribución del billete que pudieran apoyar la disminución de impacto ambiental, buscando hacer más eficientes las rutas utilizadas en este proceso.

Como futuras áreas de oportunidad se recomienda realizar un estudio detallado del sistema y logística de distribución del billete, buscando implementar combustibles y vehículos que disminuyan el impacto ambiental asociado a esta etapa. De igual manera se recomienda realizar la evaluación del desempeño ambiental de las monedas acuñadas por el Banco de México mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

REFERENCIAS

- APME. (2007). Plastics Europe. Association of Plastics Manufacturers (APME). Life Cycle and Eco-profiles.
- Banco Central Europeo. (2003). *Impacto Ambiental de los Billetes Euros*. Retrieved from [www.ecb.europa.eu](http://www.ecb.europa.eu/euro/banknotes/html/environment.es.html): <http://www.ecb.europa.eu/euro/banknotes/html/environment.es.html>
- Banco de México. (2013, Junio). *Billetes Fabricados en el Banco de México*. Retrieved from [banxico.org.mx](http://www.banxico.org.mx): <http://www.banxico.org.mx/billetes-y-monedas/informacion-general/fabricacion-de-billetes-y-acunacion-de-moneda/material-educativo/%7B24C9A5AF-2266-03E5-B469-1C0F52C0D4C6%7D.pdf>
- Banco de México. (2013, Enero). *Fabricación de Billetes*. Retrieved from [banxico.org.mx](http://www.banxico.org.mx): <http://www.banxico.org.mx/billetes-y-monedas/informacion-general/fabricacion-de-billetes-y-acunacion-de-moneda/material-educativo/%7BBBA1E3EC-4631-24BC-6409-01F080628B6D%7D.pdf>
- Banco de México. (2013, Agosto). *Historia de la moneda y del billete en México*. (L. editores, Ed.) Retrieved from [banxico.org.mx](http://www.banxico.org.mx): <http://www.banxico.org.mx/billetes-y-monedas/material-educativo/basico/%7BA29C46B4-65AB-995E-7961-146624BC06E0%7D.pdf>
- Banco de México. (2014, Enero). *El uso del polímero en los billetes del Banco de México*. Retrieved from www.banxico.org: <http://www.banxico.org/billetes-y-monedas/informacion-general/fabricacion-de-billetes-y-acunacion-de-moneda/material-educativo/%7B5BDF7E98-6054-C924-7CE2-D3C2D03211C7%7D.pdf>
- Banco de México. (2014, Julio). *Fábrica de Billetes del Banco de México*.
- Bank of Canada. (2011). *Life Cycle Assessment of Canada's Polymer Bank Notes and Cotton-Paper Bank Notes, Final report*. Ottawa: PE Americas & Tryskele.
- Bank of England. (2013). *Environmental impact of paper and polymer*. Retrieved from www.bankofengland.co.uk: <http://www.bankofengland.co.uk/banknotes/polymer/Documents/environmentalimpact.pdf>
- Bare, J., Norris, G., Pennington, D., & Mckone, T. (2003). The tool for the reduction and assesment of chemical and other environmental impacts. *Journal of Industrial Ecology* 6, 49-78.
- Beusen, A. (2005). User manual of CARMEN1. National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM). Bilthoven (Manuscript, not published).
- Birkved, M., & Hauschild, M. (2006). PestLCI – a model for estimating field emissions of pesticides in agricultural LCA. *Ecol. Model* 198 (3–4), 433–451.
- Boaden, A. (2009). La experiencia de Nueva Zelanda con los billetes de polímero. *Billetaria*, 12-13.

- Bouhdaoui, Y., Bounie, D., & Van Hove, L. (2013). When do plastic bills lower the bill for the central bank? a model and estimates for the U.S. *Journal of Policy Modeling* 35, 45-60.
- BRBNMPL. (2010). *Bharatiya Reserve Bank Note Mudran Private Limited*. Retrieved from <http://www.brbnmpl.co.in/>.
- Bruch, K., Gohlke, D., Kögler, C., Krüger, J., Reuter, M., Röpenack, I., . . . Winkler, P. (1995). Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung und -verarbeitung. *Part 1. Metall*, 49 (4), 252–257.
- Chacon, J. (2008). *Historia Ampliada y comentada del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)*. (R. E. Ingenieria, Ed.) Retrieved from https://portal.uah.es/portal/page/portal/epd2_asignaturas/asig253037/informacion_academica/Historia%20ampliada%20y%20comentada%20del%20ACV.pdf
- Chi Thanh, N. (2009). Billetes de polímero en Vietnam. *Billetaria*, 17.
- Christensen, T., Bhandar, G., Lindvall, H., Larsen, A., Fruergaard, T., Damgaard, A., . . . Hauschild, M. (2007). Experience with the use of LCA-modelling (EASEWASTE) in waste management. *Waste Manage*, 25, 257–262.
- Ciroth, A. (2007). ICT for environment in Life Cycle Applications: open LCA a new open source software for Life Cycle Assessment. *Int. J. LCA*, 12 (4), 209–210.
- CNBV. (2013). *Comisión Nacional Bancaria y de Valores*. Retrieved from <http://portafoliodeinformacion.cnbv.gob.mx/>
- Cominsa. (2013). *Fracturación de pozos para extracción de gas*. Retrieved from Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A. de C.V: <http://www.cominsa.com.mx/cit/data/GasShale/ESTUDIO%20fracturacion%20de%20pozos-v2.pdf>
- CPM. (2007). SPINE@CPM database. Competence Center in Environmental Assessment of Product and Material Systems (CPM), Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Curran, M. (2007). Co-product and input allocation approaches for creating lifecycle inventory data.
- Curran, M., Mann, M., & Norris, G. (2005). The international workshop on electricity data for life cycle inventories. *J. Cleaner Prod.*, 13 (8), 853–862.
- Dante, R., Güereca, L., Neri, L., Escamilla, J., Aquino, L., & Celis, J. (2002). Life cycle analysis of hydrogen fuel: a methodology for a strategic approach of decision making. *International Journal of Hydrogen Energy*, 131-133.
- De Schryver, A., Brakkee, K., Goedkoop, M., & Huijbregts, M. (2013). Characterization Factors for Global Warming in Life Cycle Assessment based on Damages to Humans and Ecosystems. *Environmental Science & Technology*; Manuscript Submitted.

- De Vries, W., Reinds, G., Van Dobben, H., De Zwart, D., Aamlid, D., Neville, P., . . . Velet, E. (2002). Intensive Monitoring of Forest Ecosystems in Europe. Technical Report 2002. *EC, UN/ECE: Brussels, Geneva.*
- Deutsches Kupferinstitut. (1995). Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung und – verarbeitung.
- Diebold. (2015). *www.diebold.com.* Retrieved from http://www2.diebold.com/pas/cut_sheets/cut_sheet_files/Self%20service%20terminals%20-%20ATMs/OptevaCashDispensers/177594r03.pdf
- Doka, G. (2003). Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf. *Ecoinvent Report No. 13 (Parts I–IV).*
- Doka, G., & Hischier, R. (2005). Waste treatment and assessment of long-term emissions. *Int. J. LCA*, 10, 77–84.
- Dumitriu, R. (2009). Billetes de polímero en Rumanía. *Billetaria*, 14-15.
- Ecoinvent 3.0. (2013). Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Ecoinvent Centre).
- Ecoinvent v3.01. (2013). Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Ecoinvent Centre).
- Ekvall, T., & Andrae, A. (2006). Attributional and consequential environmental assessment of the shift to lead-free solders. *Int. J. LCA*, 11 (5), 344–353.
- Ekvall, T., & Finnveden, G. (2001). Allocation in ISO 14041 – a critical review. *J. Cleaner Prod*, 9, 197–208.
- ELCD. (2007). European Commission. Directorate General Joint Research Centre (JRC), European Reference Life Cycle Database.
- Elkington, J. (1998). *Cannibals with Forks – The Triple Bottom Line of 21st Century Business.* New Society Publishers, Canada.
- ENCC. (2013). *Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión 10-20-40.* México: Gobierno de la República.
- ENIGH. (2012). *Encuesta de Ingreso-Gasto de los Hogares.* Retrieved from Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/Encuestas/Hogares/regulares/Enigh/Enigh2012/tradicional/default.aspx>
- ENPCS. (2012). *Estrategia Nacional de Producción y Consumo Sustentable.* México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Gobierno Federal.
- FEFCO. (2006). European Federation of Corrugated Board Manufacturers (FEFCO). European Database for Corrugated Board – Life Cycle Studies. Brussels, Belgium.

- Finnveden, G., Albertsson, A., Berendson, J., Eriksson, E., Höglund, L., Karlsson, S., & Sundqvist, J. (1995). Solid waste treatment within the framework of life-cycle assessment. *J. Cleaner Prod.*, 3, 189–199.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., . . . Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 1-21.
- Format Converter. (2008). Format conversion tool. Obtenido de: <<http://sourceforge.net/projects/openlca>>.
- Funtowicz, S., & Ravetz, J. (1990). Uncertainty and Quality in Science for Policy. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*.
- GaBi. (2015). *thinkstep GaBi*. Retrieved from <http://www.gabi-software.com/mexico/index/>
- Galán, M., & Negueruela, D. (2009). Opinión Editorial. *Billetaria*, 2.
- Giusti, R. M., & Vásquez, J. L. (2013, Febrero). Los billetes de polímero: la experiencia internacional. *Política monetaria ante la incertidumbre. Revista Moneda*, 153, 19-23. Retrieved from Banco Central de Reserva del Perú, Revista Moneda: <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Revista-Moneda/moneda-153/moneda-153-05.pdf>
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2000). Eco-indicator 99 a damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. PRé, product ecology consultants.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Struijs, J., van Zelm, R., & De Schtyver, A. (2013). *ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*. Ruimte en Milieu Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer: First edition (version 1.08).
- Grießhammer, R., Benoît, C., Dreyer, L., Flysjö, A., Manhart, A., Mazijn, B., . . . Weidema, B. (2006). Feasibility Study: Integration of Social Aspects into LCA. *UNEP-SETAC Life Cycle Initiative, Paris*.
- Güereca Hernández, L. P. (2006). Tesis Doctoral. *Desarrollo de una metodología para la valoración en el Análisis del Ciclo de Vida aplicada a la gestión integral de residuos municipales*. Universidad Politecnica de Cataluña, Barcelona.
- Guinée, J., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppés, G., de Koning, A., Wegener Sleeswijk, A., . . . Huijbregts, M. (2002). Handbook on life cycle assessment. *Operational guide to the ISO Standards*.
- Hauschild, M. (1998). Environmental assessment of products. In: Scientific background. *Chapman & Hall, Kluwer Academic Publishers, United Kingdom, Hingham, MA, USA*.
- Hauschild, M., & Pennington, D. (2002). Indicators for ecotoxicity in life cycle impact assessment. *Striving Towards Best Practice. SETAC Press, Pensacola, FL*.

- Hauschild, M., Huijbregts, M., Jolliet, O., MacLeod, M., Margni, M., van de Meent, D., . . . McKone, T. (2008 b). Building a consensus model for life cycle impact assessment of chemicals: the search for harmony and parsimony. *Environ. Sci. Technol.*, 42, 7032–7037.
- Hauschild, M., Olsen, S., Hansen, E., & Schmidt, A. (2008 a). Gone... but not away – addressing the problem of long-term impacts from landfills in LCA. *Int. J. Life Cycle Assess*, 13, 547–554.
- Hayashi, K., Okazaki, M., Itsubo, N., & Inaba, A. (2004). Development of damage function of acidification for terrestrial ecosystems based on the effect of aluminum toxicity on net primary production. *The International Journal of LCA*, 9, 13-22.
- Heijungs, R., & Guineé, J. (2007). Allocation and “what-if” scenarios in life cycle assessment of waste management systems. *Waste Manage*, 27, 997–1005.
- Hellweg, S., Hofstetter, T., & Hungerbühler, K. (2001). Hellweg, S., Hofstetter, T.B., Hungerbühler, K., Modeling waste incineration for life cycle inventory analysis in Switzerland. *Environ Model. Assess*, 6, 219–235.
- Hellweg, S., Hofstetter, T., & Hungerbühler, K. (2003). Discounting and the environment. Should current impacts be weighted differently than impacts harming future generations? *Int. J. LCA*, 8, 8–18.
- Hertwich, E., Pease, W., & McKone, T. (1998). Evaluating toxic impact assessment methods: what works best? *Environ. Sci. Technol*, 32:A138-A144.
- Huijbregts, M., Rombouts, L., Ragas, A., & Van de Meent, D. (2005). Human-toxicological effect and damage factors of carcinogenic and non-carcinogenic chemicals for life cycle impact assessment. *Assessment and Management*, 1 (3): 181-244.
- Huijbregts, M. (1998). Application of uncertainty and variability in LCA. Part I: A general framework for the analysis of uncertainty and variability in life cycle assessment. *Int. J. Life Cycle Assess*, 3, 273–280.
- Hunt, R. G., & Franklin, W. E. (1996). LCA- How it came about: Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1 (1), 4-7.
- IISI. (2007). International Iron and Steel Institute (IISI). LCI data on steel production. Disponible en: <<http://www.worldstainless.org/Aboutstainless/Ssbandphe/LCI/>> datos disponibles sólo bajo petición.
- IMNC. (2009). NMX-SAA-14044-IMNC-2008. *Gestión Ambiental-Análisis de Ciclo de Vida-requisitos y directrices*.
- INE. (2009). Estudio comparativo de bolsas de plástico degradables versus convencionales mediante la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida. *Dirección de Investigación en Residuos y Sitios*

Contaminados, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Instituto Nacional de Ecología.

INEGI. (2012). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Retrieved from <http://www.inegi.org.mx/>

Innovia Security. (2015). *Innovia Security*. Retrieved from <https://www.innoviasecurity.com/>

IPCA. (2012). *www.polymernotes.org*. Retrieved from www.polymernotes.org

IPCC. (1990). *Climate Change: The Intergovernmental Panel on Climate Change Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs: [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)].

IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC. (2013). Annex III: Glossary [Planton, S. (ed.)]. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Stocker, T.F.; Qin, D.; G.-K, Plattner; M., Tignor; S.K., Allen; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P.M] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

ISO. (2006). ISO 14000 Environmental Management. International Organization for Standardization.

ISO. (2006). ISO 14000/44 Environmental Management--Life cycle assessment -- Requirements and guidelines. International Organization for Standardization.

IUSES. (2010). *Uso de la energía en el sector industrial. Intelligent use of energy at school*.

JEMAI. (2007). *Japan Environmental Management Association for Industry database* (solo disponible en Japonés).

Jimenez-Gonzales, C., Kim, S., & Overcash, M. (2000). Methodology for developing gate-to-gate life cycle inventory information. *Int. J. LCA*, 5, 153–159.

Jørgensen, A., Le Bocq, A., & Hauschild, M. (2008). *Methodologies for Social Life Cycle Assessment*.

Koellner, T., & Scholz, R. (2007). Assessment of the land use impacts on the natural environment. Part 1. An analytical framework for pure land occupation and land use change. *Int. J. LCA*, 12, 16–23.

- Köhler, A., Hellweg, S., Escher, B., & Hungerbühler, K. (2006). Organic pollutant removal versus toxicity reduction in industrial wastewater treatment: the example of wastewater from fluorescent whitening agent production. *Environ. Sci. Technol.*, 40, 3395–340.
- Köllner, T. (2001). Land Use in Product Life Cycles and its Consequences for Ecosystem Quality. PhD thesis No. 2519, University St. Gallen.
- Kremer, M., Goldhan, G., & Heyde, M. (1998). Waste treatment in product specific life cycle inventories. An approach of material related modelling. Part 1: Incineration. *Int. J. LCA*, 3, 47–55.
- Larsen, H., Hansen, M., & Hauschild, M. (2009). Including chemical-related impact categories in LCA on printed matter – does it matter? *J. Cleaner Prod.*, 17, 115–128.
- LGCC. (2012). *Ley General de Cambio Climático*. México: Diario Oficial de la Federación 06-06-2012. Presidencia de la República.
- Lindeijer, E., Müller-Wenk, R., & Steen, B. (2002). Impact assessment of resources and land use. Life-Cycle Impact Assessment: Striving Towards Best Practise. *SETAC Press, Pensacola, FL*.
- Lindfors, L.-G., Christiansen, K., Hoffman, L., Virtanen, Y., Juntilla, V., Hanssen, O., . . . Finnveden, G. (1995). Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment. Nord. *Nordic Council of Ministers, Copenhagen, Denmark*, 20.
- Lundie, S., Citroth, A., & Huppes, G. (2007). *Inventory methods in LCA: towards consistency and improvement – Final Report*. UNEP-SETAC Life Cycle Initiative.
- MacArthur, R., & Wilson, E. (1967). *The Theory of Island Biogeography*.
- McMichael, A., Campbell-Lendrum, D., Corvalan, C., Ebi, K., Githeko, A., Scheraga, J., & Woodward, A. (2003). Climate change and human health. Risk and responses. *World Health Organization, Geneva.*, 322p.
- Meinshausen, M. (2005). *Emission & Concentration Implications of long-term Climate Targets*. Retrieved from Dissertation 15946 for the Swiss federal Institute of Technology, Zurich: http://www.up.ethz.ch/publications/dissertations/MalteMeinshausen_2005_dissertation.pdf
- Menzies G. (2004). Money to burn, or melt? A cost benefit analysis of Australian polymer banknotes. *North american Journal of Economics and Finance.*, 15, 355-368.
- Michelsen, O. (2008). Assessment of land use impact on biodiversity. Proposal of a new methodology exemplified with forestry operations in Norway. *Int. J. LCA*, 13, 22–31.
- Mila i Canals, L., Bauer, C., Depestele, J., Dubreuil, A., Freiermuth Knuchel, R., Gaillard, G., . . . Rydgren, B. (2007). Key elements in framework for land use impact assessment within LCA. *Int. J. LCA*, 12, 5–15.
- Montoya, I. (2009). Billetes de polímero: experiencia en Chile. *Billetaria*, 16.

- Morgan, M., & Henrion, M. (1990). *Uncertainty. A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Murray, C., & Lopez, A. (1996). The global burden of disease: a comprehensive assessment of mortality and disability from diseases, injuries, and risk factors in 1990 and projected to 2020. *Global Burden of Dis-ease and Injury Series Volume I*. Harvard School.
- Museu de Prehistòria de València. (2011). *Historia del Dinero*. Retrieved from [museuprehistoriavalencia.es](http://www.museuprehistoriavalencia.es):
<http://www.museuprehistoriavalencia.es/resources/files/Catalogos/Historia%20dels%20diners.pdf>
- Narita, N., Nakahara, Y., Morimoto, M., Aoki, R., & Suda, S. (2004). Current LCA database development in Japan – results of the LCAproject. *Int. J. Life Cycle Assess*, 9, 355–359.
- Nielsen, P., & Hauschild, M. (1998). Product specific emissions from municipal solid waste landfills. *Part I: Landfill model*. *Int. J. LCA*, 3, 158–168.
- NREL. (2004). National Renewable Energy Laboratory (NREL). US Life Cycle Inventory Golden, CO. <http://www.nrel.gov/lci/>.
- Obersteiner, G., Binner, E., Mostbauer, P., & Salhofer, S. (2007). Obersteiner, G., Binner, E., Mostbauer, P., Salhofer, S. Landfill modelling in LCA – a contribution based on empirical data. *Waste Manage*, 27, S58–S74.
- Olsen, S. (2001). Life cycle impact assessment and risk assessment of chemicals a methodological comparison. *Impact Assess*, 385–404.
- Patel, M. (2009). *Sustainability assessment of technologies – mid term and long term research to improve the sustainability evaluation of technologies*.
- Pennington, D., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., & Rebitzer, G. (2004). Life cycle assessment (Part 2): Current impact assessment practise. *Environ. Int.*, 30, 721–739.
- PND. (2013). *Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018*. México: Gobierno de la República.
- PNUMA. (2014). *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*. Retrieved from <http://www.pnuma.org/>
- Polímero clásico. (2012). *Polímero clásico*. Retrieved from <http://elpolimeroclassico.blogspot.mx/2012/01/el-primer-billete-de-polimero-los.html>
- ProSuite. (2009). *European Commission*. Retrieved from <http://prosuite.org/>
- Reserve Bank of Australia. (1998). *Note printing Australia Life Cycle Assessment of Polymer Banknotes*. Retrieved from <http://www.currencyaffairs.org>:
http://www.currencyaffairs.org/templates/files/library/Life_Cycle_Assessment_of_Polymer_-NPA.pdf

- Reserve Bank of Australia. (2002, Junio). *Polimer Banknotes in Australia- 10 years on*. Retrieved from <http://www.polymernotes.org>: <http://www.polymernotes.org/resources/taylor1.pdf>
- Reserve Bank of Australia. (2013). Retrieved from <http://www.rba.gov.au/>.
- Ríos Insúa, D. (1990). Sensitivity análisis in multiobjective decisión making. *Springer-Verlag, Berlín*.
- RMIT. (2007). Centre for Design, RMIT University. Australian LCI Database.
- Rosenbaum, R., Bachmann, T., Hauschild, M., Huijbregts, M., Jolliet, O., Juraske, R., . . . van de Meent, D. (2007). USEtox – the UNEP/SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* , 13, 532–546.
- Sa-nguandekul, S. (2011). Experiencia del Banco de Tailandia con billetes de alta durabilidad. *Billetaria*, 30-31.
- SENER. (2013). *Sector Eléctrico Nacional, Subsecretaría de Electricidad*. Retrieved from <http://egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html>
- SETAC. (2002). Guidelines for Life Cycle Assessment: A Code of Practice. *Análisis del Ciclo de vida*.
- SETAC. (2014). *Sociedad de Toxicología y Química Ambiental*. Retrieved from <http://www.setac.org/>
- SETAC, PNUMA. (2009). Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. *United Nations Environment Programme*.
- Seyler, C., Hellweg, S., Monteil, M., & Hungerbühler, K. (2005 a). Life cycle inventory for use of waste solvent as fuel substitute in the cement industry: a multi-input allocation model. *Int. J. LCA*, 10, 120–130.
- Seyler, C., Hofstetter, T., & Hungerühler, K. (2005 b). Life cycle inventory for thermal treatment of waste solvent from chemical industry: a multi-input allocation model. *J. Cleaner Prod.*, 13, 1211–1224.
- SICPA. (2013). *The Story of Security Inks*. Retrieved from <http://www.sicpa.com/security-inks/story-security-inks>
- Sidney J. (2009). Results of the circulation trial of a R\$10 polymer note commemorating the fifth centenary of the discovery of Brazil. *Billetaria-International Review on Cash Management. Banco de España*, 3 (5) 10-11.
- Sima Pro LCA. (2015). *Sima Pro LCA*. Retrieved from <http://simapro.com/>
- Substances & Technologies. (2014). *Producción de polímero*. Retrieved from <http://www.substech.com/>.

- Sundqvist, J.-O., Finnveden, G., Stripple, H., Albertsson, A.-C., Karlsson, S., Berendson, J., & Höglund, L.-O. (1997). Life Cycle Assessment and Solid Waste – Stage 2. AFR. . *Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm*.
- Suppen, N. (2005). LCA Association in Latin America. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 10 (5),376.
- Swiss National Bank. (1999). *Life Cycle Assessment (LCA) of Swiss banknotes*. Retrieved from [www.snb.ch: http://www.snb.ch/en/mmr/reference/life_cycle_banknotes/source](http://www.snb.ch/en/mmr/reference/life_cycle_banknotes/source)
- Textos científicos. (2013). *textoscientificos.com*.
- Thomassen, M., Dalgaard, R., & Heijungs, R. (2008). Attributional and consequential LCA of milk production. *Int. J. Life Cycle Assess*, 13, 339–349.
- Thompson, M., Ellis, R., & Wildavsky, A. (1990). *Cultural Theory*. Westview Print Boulder .
- Tillman, A.-M., Ekvall, T., Baumann, H., & Rydberg, T. (1994). Tillman, A.-M., Ekvall, T., Baumann, H., Rydberg, T., Choice of system boundaries in life cycle assessment. *J. Cleaner Prod.*, 2, 21–29.
- Tiruta-Barna, L. (2007). Environmental impact and risk assessment of mineral wastes reuse strategies: review and critical analysis of approaches and applications. *Resour. Conserv.*
- Torras Papel S.A. (2008). *Fabricación de Papel*. Retrieved from www.torraspapel.com.
- Traxco. (2012). <http://www.traxco.es/>.
- Trujillo Morejón, A. (2004). Polímero versus papel moneda. *Revista del Banco Central de Cuba*, 31-32.
- UBA. (2007). Umweltbundesamt (UBA), German Environmental Protection Agency.
- Udo de Haes, H., Finnveden, G., Goedkoop, M., Hauschild, M., Hertwich, E., Hofstetter, P., . . . Steen, B. (2002). Life cycle impact assessment: striving towards best practice. *SETAC: Pensacola (Fl), USA*.
- Van Dijk, A., Van Wijnen, H., Chaplin, G., & Slaper, H. (2007). "Skin-colour: the natural sunscreen against skin cancer", In preparation.
- Van Zelm, R., Van Jaarsveld, H., Reinds, G., Huijbregts, M., Struijs, J., & van de Meent, D. (2007). Time horizon dependent characterization factors for acidification in life-cycle assessment based on forest plant species occurrence in Europe. *Environmental Science & Technology* 41 , 922-927.
- Weidema, B. (2003). Market Information in Life Cycle Assessment. In: Environmental Project No. 863. Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen. *Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen*.

Zimmermann, P., Doka, G., Huber, F., Labhardt, A., & Menard, M. (1996). Ökoinventare von Entsorgungsprozessen, Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen. *Institut für Energietechnik, ETH Zurich. ENET.*

ANEXO 1

En este apartado se presentan las tablas con la versión original en inglés de los nombres exactos de los módulos o dataset que se extrajeron de la base de datos Ecoinvent v3.01 para la realización de este estudio.

Tabla 4.1 Procesos incluidos en el ciclo de vida del billete impreso en papel AD

Etapa de ciclo de vida	Proceso unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ Dataset Ecoinvent 3.01
Extracción de materias primas para fabricación de sustrato	Extracción de materias primas para papel AD	This dataset describes the electricity available on the high voltage level in this country. This is done by showing the transmission of 1kWh electricity at high voltage.	Market for electricity, high voltage [DE]
		Manufacture of paints, varnishes and similar coatings, printing ink and mas.	Market for acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state [GLO]
		Agricultural production/plant production.	Market for cotton fibre [GLO]
		Steam and air conditioning supply based on liquid fuels.	Market for heat, district or industrial, natural gas [Europe without Switzerland]
		Manufacture of basic chemicals	Manufacture of basic chemicals
Producción de sustrato	Producción de papel AD	Entradas y salidas del proceso (electricidad, agua, gas natural, insumos, residuos)	Paper AD supplier
		Treatment and disposal of hazardous waste.	Market for hazardous waste, for incineration [GLO]
Extracción y producción de materias primas	Producción de tintas	Manufacture of paints, varnishes and similar coatings, printing ink and mas.	Market for printing ink, offset, without solvent, in 47.5% solution state [GLO]
	Producción de planchas calcográficas	Copper and zinc including their melting and casting of brass ingots.	Market for brass [GLO]
	Producción de planchas y láminas offset	Production of tin plated chromium steel sheet. The basic material coated is chromium steel 18/8.	Market for tin plated chromium steel sheet, 2 mm [GLO]
		Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant.	Market for polymethyl methacrylate, sheet [GLO]
Extracción de materias primas para producción de empaques	Empaques	This dataset describes the electricity available on the high voltage level in this regional entity of the North American Electric Reliability Corporation (NERC). This is done by showing the transmission of 1kWh electricity at high voltage.	Electricity, high voltage, production mix [US]
		Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant.	Market for nylon 6, glass-filled [GLO]

Etapa de ciclo de vida	Proceso unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ Dataset Ecoinvent 3.01
Extracción de materias primas para producción de empaques	Empaques	This process contains the plastic amount and the transport of the plastic from the production site to the converting site as well as the dataset "extrusion, plastic film"	Market for packaging film, low density polyethylene [GLO]
		Treatment and disposal of non-hazardous waste	Market for waste paperboard [GLO]
		Waste management/municipal incineration	Market for waste polyethylene [GLO]
	Contenedores	This dataset describes the electricity available on the high voltage level in this regional entity of the North American Electric Reliability Corporation (NERC). This is done by showing the transmission of 1kWh electricity at high voltage.	Electricity, high voltage, production mix [US]
		Extraction of natural gas	Market for natural gas, unprocessed, at extraction [GLO]
		Manufacture of plastics and synthetic rubber in primary forms	Market for polyethylene, linear low density, granulate [GLO]
		Manufacture of basic iron and steel	Market for section bar rolling, steel [GLO]
Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	market for sheet rolling, aluminium [GLO]		
Importación de materias primas	Transporte de importación de materias primas	Transporte de carga por aire, tierra y/o mar de las materias primas de Banco de México (Sustrato, tintas, planchas de latón, planchas y láminas, empaques y contenedores)	Market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 [GLO]
			Transport, freight train, electricity [Europe without Switzerland]
			market for transport, freight, aircraft [GLO]
			Market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [GLO]
			Market for transport, freight, sea, transoceanic ship [GLO]
Impresión de billetes	Fábrica de Billetes	This dataset describes the electricity available on the high voltage level in this country. This is done by showing the transmission of 1kWh electricity at high voltage.	Electricity, high voltage, production mix [MX]
		Quarrying of stone, sand and clay	Market for perlite [GLO]
		This report assumes that HCl is generated from combustion of chlorine with hydrogen HCl is also produced as a by-product by several processes (TDI, MDI, fluorocarbons), for which no allocation was carried out, in part due to a lack of data.	Market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state [RER]
		This module contains material and energy input, production of waste and emissions for the production of hydrogen peroxide by the	Market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state [GLO]

Etapa de ciclo de vida	Proceso unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ Dataset Ecoinvent 3.01
Impresión de billetes	Fábrica de Billetes	anthrachinone process. Transport and infrastructure have been estimated.	
		Manufacture of paints, varnishes and similar coatings, printing ink and mas	Market for acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state [GLO]
		Raw materials, processing energy, emissions to air and water from process, energy services and transports, infrastructure only partly included, no infrastructure of main process included, no land use data included.	Market for trichloroethylene [GLO]
		Raw materials and chemicals used for production, transport of materials to manufacturing plant, estimated emissions to air and water from production (incomplete), estimation of energy demand and infrastructure of the plant (approximation). Solid wastes omitted.	Market for isopropanol [GLO]
		The module production by electrolysis from ore and by electrothermic process from ferromanganese and slag.	Market for manganese [GLO]
		Mix of the 15 of the most often used organic solvents, having their own dataset within the database. Only input of the mentioned solvents is taken into account.	Market for solvent, organic [GLO]
		From the reception of potassium hydroxide and carbon dioxide at the factory gate, production of potassium carbonate including materials, energy uses, infrastructure and emissions.	Market for potassium carbonate [GLO]
		Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant	Market for polyvinylchloride, emulsion polymerised [GLO]
		Inventory Includes the obtention of SO2-containing gas (by means of oxidation of the sulphur containing raw materials: elemental sulphur, pyrites, other sulphide ores or spent acids). It includes also the conversion of SO2 to SO3 and the absorption of SO3 into solution (sulfuric acid in water) to yield Sulphuric acid.	Market for sulfuric acid [GLO]
		Manufacture of basic chemicals	Market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state [GLO]
Production of 1-propanol including materials, energy uses, infrastructure and emissions.	Market for 1-propanol [GLO]		

Etapa de ciclo de vida	Proceso unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ Dataset Ecoinvent 3.01
Impresión de billetes	Fábrica de Billetes	Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant	Market for acetone, liquid [GLO]
		Manufacture of basic chemicals	Market for calcium chloride [GLO]
		Manufacture of basic chemicals	Market for ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene [GLO]
		This module contains material and energy input, production of waste and emissions for the production of sodium silicate, 37% furnace liquid. Transport and infrastructure have been estimated. The input of compressed air is not reported in the data according to the methodology of the study.	Market for sodium silicate, without water, in 48% solution state [GLO]
		Production including refining.	Market for acetic acid, without water, in 98% solution state [GLO]
		Production of dipropylene glycol monomethyl ether including materials, energy uses, infrastructure and emissions.	Market for dipropylene glycol monomethyl ether [GLO]
Distribución de billetes	Distribución de billetes	Distribución de billetes a Cajeros Regionales y Corresponsales, vía área y terrestre	Market for transport, freight, aircraft [GLO]
			Market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [GLO]
Procesamiento de billetes	Procesamiento	Electricidad utilizada en el procesamiento y destrucción de billetes	Electricity, high voltage, production mix [MX]
Disposición final de residuos de producción y empaques	Disp. Res. Prod.	Disposición final de residuos (municipales, RME y peligrosos) generados en la Fábrica del Banco de México	Market for spent solvent mixture [GLO]
			Market for sludge from pulp and paper production [GLO]
			Market for waste paint, collection for hazardous waste incineration [GLO]
			Market for scrap lead acid battery [GLO]
			Market for municipal solid waste [GLO]
			market for waste plastic, mixture [GLO]
			Market for waste paper, sorted [GLO]
			Market for waste paperboard [GLO]
			Market for waste textile, soiled [GLO]
	Empaques y contenedores	Disposición final en relleno sanitario de empaques	Market for waste aluminium [GLO]
			Market for waste polyethylene [GLO]
Market for scrap steel [GLO]			
Disposición final de billete destruido	Disposición de billete destruido	Disposición final de billete destruido en relleno sanitario	Market for waste paper, unsorted [RoW]

Tabla 4.2 Procesos incluidos en el ciclo de vida del billete impreso en polímero

Etapa de ciclo de vida	Proceso Unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ Dataset Ecoinvent 3.01
Extracción de materias primas para fabricación de sustrato	Producción de polímero	This dataset describes the electricity available on the high voltage level in this country. This is done by showing the transmission of 1kWh electricity at high voltage.	Electricity, high voltage, production mix [AU]
		Steam and air conditioning supply based on liquid fuels	Market for heat, district or industrial, natural gas [RoW]
		Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant	Market for polypropylene, granulate [GLO]
		This process contains the auxiliaries and energy demand for the mentioned conversion process of plastics.	Market for extrusion, plastic film [GLO]
Producción de sustrato	Producción de polímero	Waste management/municipal incineration	Market for waste plastic, mixture [GLO]
		Transport to dismantling facilities, final disposal of waste material	Market for waste wood, untreated [GLO]
		Waste management/municipal incineration	Market for municipal solid waste [GLO]
		Waste management/underground deposit	Market for hazardous waste, for underground deposit [GLO]
		Transport to dismantling facilities, final disposal of waste material	Market for waste polyethylene/polypropylene product [GLO]
		Treatment and disposal of non-hazardous waste	Market for waste paint, collection for hazardous waste incineration [GLO]
		Treatment and disposal of hazardous waste	Market for hazardous waste, for incineration [GLO]
Extracción y producción de materias primas	Producción de tintas	Manufacture of paints, varnishes and similar coatings, printing ink and mas	Market for printing ink, offset, without solvent, in 47.5% solution state [GLO]
	Producción de planchas de latón	Copper and zinc including their melting and casting of brass ingots	Market for brass [GLO]
	Producción de planchas y láminas	Production of tin plated chromium steel sheet. Included sub processes are "sheet rolling" and "tin plating". The basic material coated is chromium steel 18/8.	Market for tin plated chromium steel sheet, 2 mm [GLO]
		Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant	Market for polymethyl methacrylate, sheet [GLO]

Etapa de ciclo de vida	Proceso Unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ Dataset Ecoinvent 3.01
Extracción de materias primas para producción de empaques	Empaques	This dataset describes the electricity available on the high voltage level in this regional entity of the North American Electric Reliability Corporation (NERC). This is done by showing the transmission of 1kWh electricity at high voltage.	Electricity, high voltage, production mix [US]
		Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant	Market for nylon 6, glass-filled [GLO]
		This process contains the plastic amount and the transport of the plastic from the production site to the converting site as well as the dataset "extrusion, plastic film"	Market for packaging film, low density polyethylene [GLO]
		Treatment and disposal of non-hazardous waste	Market for waste paperboard [GLO]
		Waste management/municipal incineration	Market for waste polyethylene [GLO]
	Contenedores	This dataset describes the electricity available on the high voltage level in this regional entity of the North American Electric Reliability Corporation (NERC). This is done by showing the transmission of 1kWh electricity at high voltage.	Electricity, high voltage, production mix [US]
		Extraction of natural gas	Market for natural gas, unprocessed, at extraction [GLO]
		Manufacture of plastics and synthetic rubber in primary forms	Market for polyethylene, linear low density, granulate [GLO]
		Manufacture of basic iron and steel	Market for section bar rolling, steel [GLO]
	Manufacture of basic precious and other non-ferrous metals	Market for sheet rolling, aluminium [GLO]	
Importación de materias primas	Transporte de importación de materias primas	Transporte de carga por aire, tierra y/o mar de las materias primas de Banco de México (Sustrato, tintas, planchas de latón, planchas y láminas, empaques y contenedores)	Market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5 [GLO]
		Market for transport, freight train [CH]	
		Market for transport, freight, aircraft [GLO]	
		Market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [GLO]	
		Market for transport, freight, sea, transoceanic ship [GLO]	

Etapa de ciclo de vida	Proceso Unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ Dataset Ecoinvent 3.01
Impresión de billetes	Fábrica de Billetes	This dataset describes the electricity available on the high voltage level in this country. This is done by showing the transmission of 1kWh electricity at high voltage.	Electricity, high voltage, production mix [MX]
		Quarrying of stone, sand and clay	Market for perlite [GLO]
		This report assumes that HCl is generated from combustion of chlorine with hydrogen HCl is also produced as a by-product by several processes (TDI, MDI, fluorocarbons), for which no allocation was carried out, in part due to a lack of data.	Market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state [RER]
		This module contains material and energy input, production of waste and emissions for the production of hydrogen peroxide by the anthraquinone process. Transport and infrastructure have been estimated.	Market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state [GLO]
		Manufacture of paints, varnishes and similar coatings, printing ink and mas	Market for acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state [GLO]
Impresión de billetes	Fábrica de Billetes	Raw materials, processing energy, emissions to air and water from process, energy services and transports, infrastructure only partly included, no infrastructure of main process included, no land use data included.	Market for trichloroethylene [GLO]
		Raw materials and chemicals used for production, transport of materials to manufacturing plant, estimated emissions to air and water from production (incomplete), estimation of energy demand and infrastructure of the plant (approximation). Solid wastes omitted.	Market for isopropanol [GLO]
		The module production by electrolysis from ore and by electrothermic process from ferromanganese and slag.	Market for manganese [GLO]

Etapa de ciclo de vida	Proceso Unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ Dataset Ecoinvent 3.01
Impresión de billetes	Fábrica de Billetes	Mix of the 15 of the most often used organic solvents, having their own dataset within the database. Only input of the mentioned solvents is taken into account.	Market for solvent, organic [GLO]
		From the reception of potassium hydroxide and carbon dioxide at the factory gate, production of potassium carbonate including materials, energy uses, infrastructure and emissions.	Market for potassium carbonate [GLO]
		Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant.	Market for polyvinylchloride, emulsion polymerised [GLO]
		Inventory Includes the obtention of SO ₂ -containing gas (by means of oxidation of the sulphur containing raw materials: elemental sulphur, pyrites, other sulphide ores or spent acids). It includes also the conversion of SO ₂ to SO ₃ and the absorption of SO ₃ into solution (sulfuric acid in water) to yield Sulphuric acid.	Market for sulfuric acid [GLO]
		Manufacture of basic chemicals	Market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state [GLO]
		Production of 1-propanol including materials, energy uses, infrastructure and emissions.	Market for 1-propanol [GLO]
		Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant	Market for acetone, liquid [GLO]
		Manufacture of basic chemicals	Market for calcium chloride [GLO]
		Manufacture of basic chemicals	Market for ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene
		This module contains material and energy input, production of waste and emissions for the production of sodium silicate, 37% furnace liquid. Transport and infrastructure have been estimated. The input of compressed air is not reported in the data according to the methodology of the study.	Market for sodium silicate, without water, in 48% solution state [GLO]
Production including refining.	Market for acetic acid, without water, in 98% solution state [GLO]		

Etapa de ciclo de vida	Proceso Unitario	Procesos incluidos	Fuentes de información/ Dataset Ecoinvent 3.01
Impresión de billetes	Fábrica de Billetes	Production of dipropylene glycol monomethyl ether including materials, energy uses, infrastructure and emissions.	Market for dipropylene glycol monomethyl ether [GLO]
Distribución de billetes	Distribución de billetes	Distribución de billetes a Cajeros Regionales y Corresponsales, vía área y terrestre	Market for transport, freight, aircraft [GLO]
			Market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [GLO]
Procesamiento de billetes	Procesamiento	Electricidad utilizada en el procesamiento y destrucción de billetes	Electricity, high voltage, production mix [MX]
Disposición final de residuos de producción y empaques	Disp. Res. Prod.	Disposición final de residuos (municipales, RME y peligrosos) generados en la Fábrica del Banco de México	Market for spent solvent mixture [GLO]
			Market for sludge from pulp and paper production [GLO]
			Market for waste paint, collection for hazardous waste incineration [GLO]
			Market for scrap lead acid battery [GLO]
			Market for municipal solid waste [GLO]
			Market for waste plastic, mixture [GLO]
			Market for waste paper, sorted [GLO]
			Market for waste paperboard [GLO]
	Empaques y contenedores	Disposición final en relleno sanitario de empaques	Market for waste aluminium [GLO]
			Market for waste polyethylene [GLO]
			Market for scrap steel [GLO]
Disposición final de billete destruido	Disposición de Billete destruido	Burdens from treatment of short-term leachate (0-100a) in wastewater treatment plant (including WWTP sludge disposal in municipal incinerator). Long-term emissions from landfill to groundwater (after base lining failure).	Market for waste polypropylene [GLO]

Tabla 4.9 Datos utilizados en la etapa de distribución de billete

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Dataset Ecoinvent 3.01
	Papel AD	Polímero		
Distribución del billete				
Transporte aéreo	0.57	0.30	tkm	Market for transport, freight, aircraft [GLO]
Transporte terrestre	1.00	0.52	tkm	Market for transport, freight, lorry 16-32

Tabla 4.10 Datos utilizados en la etapa de procesamiento de billete

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Dataset Ecoinvent 3.01
	Papel AD	Polímero		
Procesamiento del billete				
Electricidad	0.04291	0.0666	kWh	Electricity, high voltage, production mix [MX]

Tabla 4.11 Datos utilizados en la etapa de disposición final de residuos de producción

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Dataset Ecoinvent 3.01
	Papel AD	Polímero		
Residuos Inorgánicos				
Transporte de residuos	0.002058	0.001207	tkm	Market for transport, freight, lorry 3.5-7.5
Trapos	0.0148	0.0087	g	Market for waste textile, soiled [GLO]
Cartón	1.9293	1.1318	g	Market for waste paperboard [GLO]
Madera	9.8865	5.7996	g	Market for wood ash mixture, pure [GLO]
Metal ferroso	11.6245	6.8191	g	Metal working, average for metal product manufacturing
Papel	1.1402	0.6689	g	Market for waste paper, sorted [GLO]
Plástico	0.8113	0.4759	g	Market for waste plastic, mixture [GLO]
Inorgánicos varios	0.6767	0.3970	g	Municipal solid waste
Residuos de Manejo Especial				
Transporte de residuos	0.000265	0.000155	tkm	Market for transport, freight, lorry 3.5-7.5
Lodos provenientes de tratamiento de agua	12.2661	7.1955	g	Market for sludge from pulp and paper
Plásticos como ptereftalato de polietileno, politileno de alta y baja densidad, polipropileno, policloruro de vinilo	0.3061	0.1795	g	Market for waste plastic, mixture [GLO]
Costras de tintas	0.4026	0.2362	g	Market for waste paint, collection for hazardous waste incineration [GLO]
Residuos Peligrosos				
Transporte de residuos	0.018156	0.010651	tkm	Market for transport, freight, lorry 3.5-7.5
Aceites lubricantes usados	0.1214	0.0712	g	Oils, unspecified [soil/industrial]

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Dataset Ecoinvent 3.01
	Papel AD	Polímero		
Aceites gastados	0.0378	0.0222	g	Oils, unspecified [soil/industrial]
Disolventes orgánicos usados	0.1626	0.0954	g	Market for spent solvent mixture [GLO]
Mercurio	0.000036	0.000021	g	Mercury unspecified
Lodos provenientes de tratamiento de agua	0.1249	0.0733	g	Market for sludge from pulp and paper
Pilas y baterías gastadas	0.0430	0.0252	g	Market for scrap lead acid battery [GLO]
Residuos de pinturas	0.0181	0.0106	g	Market for waste paint, collection for hazardous waste incineration [GLO]

Tabla 4.12 Datos utilizados en el escenario de disposición final de billete en relleno sanitario

Parámetro	Cantidad /UF		Unidades	Dataset Ecoinvent 3.01
	Papel AD	Polímero		
Disposición final del billete				
Transporte	0.002622	0.001439	tkm	Market for transport, freight, lorry 3.5-7.5
Billete destruido	116.84	-	g	Market for waste paper, unsorted [RoW]
	-	60.35	g	Market for waste polypropylene [GLO]