



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Tesis para optar al Título de Magíster
en Ingeniería Ambiental

ESTUDIO COMPARATIVO DE DISTINTOS
SISTEMAS DE GESTIÓN INTEGRAL DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL
ÁREA METROPOLITANA DE MONTEVIDEO
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA
TOMO I

Autor: VÍCTOR EMMER
Director de Tesis: MAURICIO PASSEGGI

Montevideo, Uruguay
2014

Víctor Emmer

Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

Montevideo, Uruguay, 2014

“El manejo ambientalmente saludable de los residuos es más que la simple eliminación o aprovechamiento, a través de métodos seguros, de los residuos generados. Es tratar de encarar la causa fundamental del problema a fin de cambiar los patrones no sustentables de producción y consumo. Esto implica el uso del ciclo vital, que ofrece la oportunidad única de conciliar el desarrollo con la protección del medio ambiente”.

Agenda 21, Capítulo 21

Conferencia de las Naciones Unidas
sobre Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

Río de Janeiro, 1992

TABLA DE CONTENIDO

TOMO I

TABLA DE CONTENIDO	iv
RESUMEN.....	vii
PALABRAS CLAVES	ix
SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Formulación del problema.....	6
1.3 Objetivos	7
1.4 Relevancia del estudio	9
1.5 Metodología	10
1.6 Organización del texto.....	13
2. BASES CONCEPTUALES.....	16
2.1 Introducción.....	17
2.2 Definición y características de los residuos.....	17
2.3 Gestión de residuos	20
2.4 Orden jerárquico de manejo de residuos	25
2.5 Marco de referencia del ACV	28
2.6 Aplicación del ACV en la gestión de RSU	35
2.7 Limitaciones del ACV	42
3. CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU EN EL AMM.....	49
3.1 Introducción.....	50
3.2 Características del AMM	51
3.3 Generación de RSU en el AMM	53
3.4 Conclusiones del diagnóstico de la gestión de RSU en el AMM	56

4.	ALCANCE DEL ACV	58
4.1	Introducción.....	59
4.2	Función y unidad funcional.....	59
4.3	Límites del sistema.....	61
4.4	Definición de los sistemas de gestión a estudiar.....	63
4.4.1	Sistema 0	68
4.4.2	Sistema 1	70
4.4.3	Sistema 2	72
4.4.4	Sistema 3	75
4.4.5	Variación de la composición	78
4.5	Calidad de los datos utilizados.....	80
4.6	Indicadores y categorías de impacto.....	81
4.6.1	Calentamiento global	85
4.6.2	Acidificación.....	87
4.6.3	Eutrofización	88
4.6.4	Volumen ocupado en SDF.....	91
4.6.5	Tasa global de recuperación de materiales	91
4.6.6	Consumo de combustibles y energía eléctrica	92
4.6.7	Emisión de dioxinas y furanos.....	93
5.	DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS UNITARIOS.....	95
5.1	Introducción.....	96
5.2	Separación en origen	97
5.3	Combustibles y energía eléctrica	97
5.4	Recolección y transporte.....	104
5.5	Incineración.....	110
5.6	Plantas de clasificación y acondicionamiento	116
5.7	Reciclaje.....	118
5.8	Tratamiento biológico	129
5.9	Disposición final	136
6.	APLICACIÓN DEL MODELO DE ACV	142
6.1	Introducción.....	143
6.2	Modelos existentes de ACV	144
6.3	Desarrollo del modelo	148

7.	RESULTADOS DEL ICV	155
7.1	Introducción.....	156
7.2	Resultados	157
7.2.1	Sistema 0	157
7.2.2	Sistema 1	166
7.2.3	Sistema 2	173
7.2.4	Sistema 3	185
7.2.5	Comparación entre sistemas	194
7.2.6	Variación de la composición	205
8.	CONCLUSIONES E IDENTIFICACIÓN DE OPORTUNIDADES	211
8.1	Introducción.....	212
8.2	Conclusiones.....	212
8.3	Incertidumbres y limitaciones	221
8.4	Identificación de oportunidades.....	224
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	229

RESUMEN

El objetivo general del presente trabajo consiste en la comparación de sistemas y escenarios alternativos gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) generados en el Área Metropolitana de Montevideo (AMM) mediante la aplicación de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Se propone aplicar la metodología de ACV sobre 4 sistemas diferentes de acuerdo a las distintas alternativas de tratamiento y disposición existentes. Estas corresponden a una combinación de los procesos de disposición final, incineración, reciclaje y tratamiento biológico. A su vez, se plantean un total de 17 escenarios posibles dentro de estos sistemas, variando las tasas de clasificación de residuos, los parámetros operativos y la composición de los residuos que ingresan al sistema.

La aplicación de la metodología de ACV fue realizada mediante un modelo de Inventario de Ciclo de Vida (ICV) desarrollado a partir del presente trabajo. El modelo permite obtener el inventario de las emisiones de los distintos contaminantes considerados y los requerimientos de insumos asociados a cada escenario. A partir de los resultados del modelo se determinan los indicadores de categorías de impacto, incluyendo Calentamiento Global, Acidificación y Eutrofización, además de una serie de

indicadores ambientales y energéticos, conformando así los criterios utilizados en la comparación de los desempeños de los sistemas propuestos.

Entre las conclusiones alcanzadas, se destaca la necesidad de mejorar el sistema actual de gestión, basado fundamentalmente en la disposición final de residuos, dado que éste es muy ineficiente en la revalorización de los residuos y causante de impactos ambientales significativos.

Desde el punto de vista energético, la revalorización de residuos encuentra sus niveles máximos para una combinación de reciclaje de la fracción seca junto a la incineración masiva del resto de la fracción mixta no clasificada. Sin embargo, resulta de gran importancia mantener un control estricto de las emisiones producto de la combustión de residuos, de forma de reducir los impactos producidos. La incorporación de tratamiento biológico de la fracción húmeda no representa mayores beneficios, más allá de la producción de compost que puede encontrar aplicación en el mejoramiento de suelos, además de mejorar el proceso de incineración como consecuencia del retiro de materiales de bajo poder calorífico.

PALABRAS CLAVES

Residuos Sólidos Urbanos, Gestión Integral de Residuos, Análisis de Ciclo de Vida

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

AP: Poder de Acidificación

AMM: Área Metropolitana de Montevideo

CDR: Combustible Derivado de Residuos

DINAMA: Dirección Nacional de Medio Ambiente

DNE: Dirección Nacional de Energía

EICV: Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida

FORSU: Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos

GEI: Gases de Efecto Invernadero

ICV: Inventario de Ciclo de Vida

IdeM: Intendencia de Montevideo

IdeC: Intendencia de Canelones

IdeSJ: Intendencia de San José

INE: Instituto Nacional de Estadísticas

MIEM: Ministerio de Industria, Energía y Minería

MVOTMA: Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente

PCI: Poder Calorífico Inferior

PCG: Potencial de Calentamiento Global

PDRS: Plan Director de Residuos Sólidos

PEAD: Polietileno de Alta Densidad

PEBD: Polietileno de Baja Densidad

PET: Polietileno Teraftalato

PP: Polipropileno

PS: Poliestireno

PTI: Parque Tecnológico Industrial del Cerro

PVC: Policloruro de Vinilo

ROC: Residuos de Obra y Construcción

RSD: Residuos Sólidos Domiciliarios

RSDPG: Residuos Sólidos Domiciliarios y de Pequeños Generadores

RSGG: Residuos Sólidos de Grandes Generadores

RSH: Residuos Sólidos Hospitalarios

RSI: Residuos Sólidos Industriales

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

SDF: Sitio de Disposición Final

TGR: Tasa Global de Recuperación de Materiales

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en una comunidad es un fenómeno inevitable que ocurre diariamente en cantidades y composiciones que varían de acuerdo al nivel de desarrollo económico y de las características propias de la población.

El crecimiento de los centros urbanos, así como la expansión económica y los cambios en los hábitos de consumo de la población ha provocado un incremento en la generación de residuos y cambios en sus características, causando numerosas alteraciones y problemas en su manejo. Esta evolución ha causado que a lo largo del tiempo, la gestión de residuos constituya una de las principales preocupaciones de las autoridades municipales de todo el mundo.

La gestión integral de los RSU consiste en el conjunto articulado de acciones normativas, operacionales, financieras y de planeamiento que una administración desarrolla para recolectar, segregar, tratar y disponer los residuos generados en una ciudad (CEMPRE, 2010). Representa un desafío complejo, con numerosos y variados actores involucrados, que demanda una planificación estratégica que considere los requerimientos de cada uno.

El deterioro de la calidad ambiental provocada por la contaminación del suelo, agua y aire, el agotamiento de los recursos naturales, los riesgos a la salud y la alteración del paisaje son las principales preocupaciones que deben ser atendidas relacionadas a la gestión de residuos.

La mayor concientización de la sociedad motivada por el aumento en la difusión y sensibilización de los problemas medioambientales, la afectación de la higiene urbana y los costos elevados de los servicios, generan una población más exigente en cuanto a la forma en que se manejan los residuos.

Es por todas estas razones que surge la necesidad de contar con un sistema de gestión de los RSU eficiente desde un punto de vista ambiental, que sea económicamente sostenible y aceptado socialmente. Además, se requiere mantener un marco normativo adecuado y el compromiso por parte de los actores políticos de forma de generar las condiciones adecuadas para optimizar las acciones llevadas a cabo.

En el Área Metropolitana de Montevideo (AMM), al igual que en el resto del país, la gestión de residuos urbanos se ha limitado prácticamente en su totalidad a la recolección de los mismos y a su disposición final en vertederos

o rellenos sanitarios. De acuerdo a estudios realizados, la gran mayoría de estos Sitios de Disposición Final (SDF) opera en condiciones inaceptables desde un punto de vista ambiental, con instalaciones cuya vida útil ha sido superada y representando fuentes directas de contaminación (FICHTNER - LKSur, 2004; CSI Ingenieros - Estudio Pittamiglio, 2011).

Esta técnica de disposición inhabilita la posibilidad de recuperar valor de los residuos más allá de la recolección de biogás, aunque ésta es por sí misma sólo parcialmente efectiva, debido a las inevitables fugas y a los tiempos por demás prolongados para su generación.

La necesidad de aprovechar al máximo los recursos disponibles y el avance de nuevas tecnologías han permitido considerar otras alternativas de revalorización de residuos. Estas tecnologías, que abarcan la incineración, tratamiento biológico y el reciclaje de corrientes específicas de residuos, han sido probadas y consolidadas a nivel internacional, transformándose en métodos seguros, ambientalmente confiables y económicamente viables, e incluso provechosos, de recuperación de materiales y energía.

Es así que en los últimos años han surgido diversos estudios enfocados, en primer lugar, a la caracterización de los residuos de forma de contar con la

información básica en la búsqueda de alternativas de gestión (FICHTNER - LKSur, 2004; González, *et al*, 2013) y, en segundo lugar, a la definición de propuestas técnicas que contribuya a la planificación estratégica en relación a la gestión de RSU (FICHTNER - LKSur, 2005).

Además, dada la necesidad de ampliar y diversificar la matriz energética nacional, también han sido desarrolladas evaluaciones sobre las alternativas específicas de revalorización energética de residuos (Themelis – Díaz, 2012).

Por otro lado, se han llevado a cabo algunas experiencias piloto en barrios de Montevideo¹ y Ciudad de la Costa² de separación en origen y recolección selectiva de materiales reciclables, así como la colocación de puntos de recepción de materiales específicos y la instalación de plantas de clasificación y acondicionamiento de materiales recuperados para su posterior comercialización a la industria del reciclaje.

Otro aspecto de suma importancia relacionado a la gestión de residuos lo constituye el gran número de clasificadores informales dedicados a la recolección de residuos y recuperación de los materiales reciclables, que han encontrado en esta actividad una forma de subsistencia. Las condiciones de

¹ <http://municipioch.montevideo.gub.uy/clasifica>

² <http://www.ciu.com.uy/innovaportal/v/15315/11/innova.front/canelones.html>

trabajo insalubres, la participación de trabajo infantil, el destino final generalmente inapropiado de los descartes y la distorsión del tránsito vehicular, entre otros aspectos, hacen que esta actividad así realizada, sea humana y ambientalmente inaceptable.

1.2 Formulación del problema

Ante la dificultad de instalación de nuevos SDF y los problemas que presentan los ya existentes, surge la necesidad de evaluar nuevas alternativas de gestión de residuos.

Sin embargo, hasta el momento las alternativas propuestas se basan en iniciativas puntuales que no suelen contemplar el problema a través de una visión global del sistema. Los objetivos estratégicos son generalmente definidos siguiendo criterios jerárquicos de gestión y dirigidos a porciones específicas de residuos, sin considerar la gestión de residuos en forma holística e integral.

Además, la falta de capacidad de predecir escenarios futuros en la planificación de los sistemas de gestión, muchas veces resulta en el diseño de instalaciones que no logran adaptarse a las necesidades y causan considerables pérdidas económicas.

Bajo una concepción integral del sistema de gestión, surge la necesidad de identificar y ponderar los aspectos técnicos, ambientales y económicos que se dan en forma indirecta y que muchas veces pueden representar aspectos de significativa importancia cuando se considera el sistema en su globalidad.

En la elaboración de un plan de gestión se apunta a la descripción de las distintas acciones relacionadas al manejo de residuos, para cada una de las cuales existe una variedad de alternativas posibles. La selección de las mejores alternativas se realiza a través de un análisis comparativo de los distintos escenarios planteados y el grado de integración de las acciones, basándose en criterios económicos, ambientales, sociales y políticos.

1.3 Objetivos

El objetivo general del trabajo propuesto consiste en la aplicación de la técnica de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a la gestión de RSU generados en el AMM.

Dentro de los objetivos específicos se encuentra la comparación de sistemas alternativos de gestión de RSU que incluyan las distintas tecnologías disponibles de tratamiento y disposición, de manera de apoyar la planificación de nuevas estrategias de gestión.

A su vez, se evalúan distintos escenarios posibles dentro de cada sistema mediante la variación tanto de la composición de los residuos, como de las tasas de separación en origen de cada una de las fracciones y otros parámetros operativos.

La comparación de los sistemas y escenarios planteados se basa en la evaluación de diversas categorías de impacto, abarcando aspectos ambientales y energéticos.

De esta manera, se pretende identificar aquellos factores de mayor relevancia dentro de la gestión de residuos, permitiendo establecer conclusiones sobre las mejores alternativas evaluadas y contribuir a la toma de decisiones.

El presente trabajo no abarca aspectos económicos ni sociales aunque se reconoce su elevada importancia. El éxito de la sustentabilidad de cualquier sistema de gestión de residuos que sea propuesto exige la consideración tanto de los factores económicos como de las características de la población involucrada.

1.4 Relevancia del estudio

Dada la visión holística e integral que se obtiene a partir de un ACV en relación a los aspectos e impactos ambientales vinculados con el sistema bajo estudio, éste representa una poderosa herramienta en la predicción de la carga ambiental global en la gestión de residuos.

La comparación de distintos escenarios permite la identificación de aquellos aspectos ambientales de mayor relevancia en el sistema global y predecir su comportamiento ante modificaciones de las condiciones de operación.

Al obtener información cuantitativa sobre los aspectos ambientales asociados a distintas alternativas de tratamiento de residuos, esta metodología constituye un soporte de gran interés en el proceso de identificación de soluciones ambientalmente sustentables a la problemática de la gestión de residuos, sin arriesgar a que las decisiones adoptadas puedan generar problemas mayores por los impactos globales e indirectos.

El desarrollo de un modelo adaptado a las condiciones locales, en el cual se puedan considerar todos los factores específicos de la gestión en los escenarios planteados, significa un aporte al conocimiento de la problemática

asociada al manejo de residuos sólidos y una contribución a la toma de decisiones.

Por otro lado, si bien no forma parte del presente estudio, el ACV representa una importante herramienta de apoyo en la evaluación económica de los modelos de gestión planteados, ya que permite considerar todos los sistemas indirectamente vinculados al manejo de RSU que muchas veces no son tenidos en cuenta.

1.5 Metodología

El ACV representa una herramienta de gran utilidad en la determinación del desempeño ambiental de productos y servicios. Para ello existe un conjunto de normas internacionales UNIT-ISO 14040, que integran la serie de normas UNIT-ISO 14000 para sistemas de gestión ambiental, y que establecen los principios y directrices para la realización de un ACV. Esta técnica intenta predecir los aspectos e impactos ambientales potenciales de un sistema de producto a lo largo de todo su ciclo de vida (“de la cuna a la tumba”) mediante un análisis que implica la recopilación y cuantificación de las entradas y salidas del sistema de producto.

Si bien el ACV ha tenido un amplio uso principalmente en la evaluación de productos y servicios, en los últimos años se han realizado diversos estudios a nivel internacional enfocados a la gestión de residuos, existiendo diversas experiencias en lo que se refiere al manejo de residuos urbanos, así como a algunas corrientes específicas de residuos (neumáticos usados, envases, baterías, etc.).

Esta técnica aplicada a la gestión de RSU incluye el análisis de las cargas ambientales asociadas a las entradas y salidas del sistema en estudio, que tengan efectos en la salud humana, los recursos y el ambiente. El análisis comienza en el punto donde los materiales pierden su valor convirtiéndose en residuos y finaliza donde se convierten en materiales inertes en el sitio de disposición final o en emisiones al aire o al agua. Para ello deben ser tenidas en cuenta las entradas y salidas de materiales y energía del sistema, incluyendo los ciclos del reciclaje y producción de materiales vírgenes en los procedimientos de asignación de flujos entre productos resultantes de un mismo proceso.

De la aplicación de los modelos de ACV que determinan las entradas y salidas del sistema, se obtienen resultados expresados en consumo de energía, consumo de recursos naturales no renovables y tasas de emisión a

la atmósfera, al agua y al suelo, los cuales pueden ser interpretados de acuerdo a los impactos potenciales sobre el medio ambiente.

La metodología de trabajo consiste en el desarrollo de un modelo de Inventario de Ciclo de Vida (ICV), y su aplicación a distintas alternativas de sistemas y escenarios de gestión de residuos, que proporcione la cuantificación de todas las cargas ambientales relevantes asociadas al sistema evaluado.

Para ello se requiere en primer lugar realizar la caracterización y diagnóstico respecto a la generación de RSU y los modelos de gestión actuales en el AMM en base a la información ya existente y en entrevistas con actores involucrados.

La selección de los sistemas de gestión a evaluar se fundamenta en la posibilidad que poseen las distintas tecnologías disponibles de tratamiento y disposición para su implementación. Entre los criterios en la definición de los sistemas propuestos se encuentran también las principales inquietudes que se tienen en la actualidad en relación a las líneas de acción a adoptar.

Si bien el objetivo del estudio no es la definición exhaustiva de todos los aspectos involucrados para alcanzar los escenarios planteados, se analizan

las opciones basadas en datos de la realidad actual, así como en criterios y experiencias internacionales. De igual forma, en la selección de las tecnologías de tratamiento y disposición se proponen aquellas que han sido estudiadas a nivel local por distintos organismos gubernamentales o por experiencias consolidadas de referencias a nivel internacional, adoptándose los parámetros de operación más importantes que definen su desempeño.

A partir de los resultados obtenidos del ICV se determinan distintos indicadores utilizados en la interpretación del ciclo de vida, los cuales son seleccionados de acuerdo con los criterios ambientales y energéticos que se desean analizar. Por otro lado, la evaluación de impactos se realiza mediante la determinación de categorías de impacto, que surgen del procesamiento de los resultados del ICV a través de los correspondientes modelos de caracterización. De esta forma, se efectúa la comparación de los sistemas y escenarios planteados identificando los aspectos de mayor relevancia que influyen en sus desempeños.

1.6 Organización del texto

El texto comienza con la **Caracterización de los RSU en el AMM**, en la cual se reseñan los resultados y conclusiones del diagnóstico en relación a los

RSU generados, cuya caracterización define el flujo de entrada a los sistemas planteados.

A continuación se presentan las **Bases Conceptuales** utilizadas en el estudio, respecto a los elementos de la gestión de RSU y de la metodología de ACV.

Luego se describe el **Alcance del ACV**, donde se refieren los criterios seleccionados a partir de los cuales se plantean los sistemas y escenarios a ser evaluados por el modelo, así como los indicadores y categorías de impacto utilizadas para interpretación de los resultados.

La siguiente sección consiste en la **Descripción de los procesos unitarios**, donde se resumen los parámetros de desempeño seleccionados para el análisis de las tecnologías de tratamiento y disposición de residuos que son incluidas en los sistemas a evaluar.

En la **Aplicación del modelo de ACV** se describen las principales características del modelo desarrollado a partir del cual se realiza la evaluación de los sistemas planteados.

En la sección **Resultados** se presenta el análisis de los resultados obtenidos en la aplicación del modelo a los distintos sistemas y escenarios planteados.

Por último, se presentan las **Conclusiones e identificación de oportunidades** que surgen de todo el análisis, así como aquellos aspectos ambientales en los que se debería profundizar para alcanzar condiciones óptimas en el manejo de residuos.

En el **Anexo I** se incluye la información complementaria a la caracterización de los RSU, en el cual se detallan los principales aspectos relacionados a la gestión actual de RSU en el AMM.

La descripción en detalle de los procesos unitarios y las tecnologías seleccionadas es realizada en el **Anexo II**, como forma de complementar los datos de desempeño utilizados en la aplicación del modelo.

Por último, el **Anexo III** presenta los resultados de los escenarios principales de los sistemas propuestos de acuerdo a cómo se obtienen en el modelo desarrollado.

2. BASES CONCEPTUALES

2.1 Introducción

En la presente sección se exponen las bases conceptuales a partir de las cuales se desarrolla el estudio.

En la primera parte se introducen los aspectos relacionados a la gestión de residuos y cómo éstos afectan el desempeño del sistema. Se introduce la definición de residuos sólidos y sus principales características a nivel general, indicando los posibles criterios de clasificación. A su vez, se describen los distintos elementos de la gestión y los requisitos que éstos deben cumplir para lograr un adecuado manejo de los residuos.

A continuación se describen los fundamentos relacionados a la elaboración de un ACV y, especialmente, su aplicación a la gestión de RSU. Se definen las etapas incluidas y la metodología empleada, así como el alcance del análisis y los aspectos que deben ser considerados.

2.2 Definición y características de los residuos

Se denomina residuos a los subproductos o restos resultantes de las actividades humanas que carecen de valor para los generadores y requieren ser desechados. Normalmente se presentan en estado sólido, semi-sólido o

semi-líquido, cuyo contenido de líquido es insuficiente para que fluyan libremente (CEMPRE, 2010).

La carencia de valor de los residuos se debe muchas veces a la composición mixta de una diversidad de materiales, que a su vez puede variar considerablemente entre distintas zonas geográficas y estaciones del año.

Existen diversos criterios de clasificación de los residuos, entre los que se pueden mencionar su composición por materiales, uso original, origen de la generación y peligrosidad.

El conocimiento de las características de los residuos generados es de gran importancia en la definición de los planes de gestión. La tasa de generación de residuos por habitante (kg/hab·día) es fundamental en el diseño de los sistemas de recolección y transporte de residuos; mientras que la composición interesa especialmente en el dimensionamiento de las instalaciones de tratamiento y disposición.

La composición de los residuos se refiere al contenido de las distintas fracciones dentro de los residuos generados y representa el punto de partida para la evaluación de las posibles medidas de revalorización. Junto a la composición por fracciones, es necesario conocer otros factores que influyen

en el desempeño de las operaciones de tratamiento, como son el contenido de humedad, el poder calorífico, la composición química, etc.

La caracterización de los residuos requiere considerar todas las particularidades tanto del sistema de gestión (número de circuitos, tipo de acondicionamiento de residuos, tipo de vehículos utilizados en transporte y frecuencia de recolección) como de la zona servida (número de hogares atendidos, densidad de población y nivel socioeconómico). Estos factores deben ser tenidos en cuenta en el procedimiento estadístico de toma de muestra, de manera de garantizar la representatividad de la totalidad de la población bajo estudio.

De acuerdo al Plan Director de Residuos Sólidos (PDRS) del AMM (FICHTNER-LKSur, 2005), se definen los RSU como aquellos residuos de origen domiciliario, comercial y público, y de otros orígenes tales como los provenientes del barrido y limpieza de vías públicas, animales muertos, muebles, etc., y residuos de escombros de construcciones menores.

A su vez, estos pueden clasificarse según el origen de la generación en tres categorías inclusivas una a otra:

- Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD): generado por actividades propias en las viviendas.
- Residuos Sólidos Domiciliarios y de Pequeños Generadores (RSDPG): incluye los RSD y los que son recolectados por el servicio municipal y generados por otras actividades, que por su volumen y composición son similares a los anteriores.
- Residuos Sólidos Urbanos (RSU): incluye los RSDPG y aquellos que por su composición son asimilables a estos pero por el volumen generado no son considerados como RSDPG. Se incluyen aquí los residuos de grandes generadores y los generados a partir del barrido y limpieza. Quedan excluidos los Residuos de Obras Civiles (ROC), los Residuos Sólidos Industriales (RSI) y los Residuos Sólidos Hospitalarios (RSH) no asimilables a urbanos.

Se entiende como grandes generadores a aquellas personas físicas o jurídicas cuyos residuos generados superan los 100 kg o 200 L diarios³.

2.3 Gestión de residuos

La gestión integral de los RSU es el conjunto articulado de acciones normativas, operacionales, financieras y de planeamiento que una administración municipal desarrolla, para recolectar, segregar, tratar y disponer los residuos generados en una ciudad (CEMPRE, 2010).

³ Éste es el criterio adoptado por la IdeM, mientras que la IdeC sólo adopta el punto de corte de los 100 kg diarios y la IdeSJ no especifica una diferenciación.

Un modelo de gestión debería basar sus objetivos en los siguientes principios:

- Preservar la salud y calidad de vida de la población
- Proteger el medio ambiente
- Promover la sustentabilidad

No se trata de definir qué tipo de tecnología de tratamiento o disposición es la más adecuada, sino de determinar en qué grado todas ellas deben articularse de forma de optimizar el desempeño de todo el sistema.

En primer lugar, la gestión de residuos requiere la adopción de medidas de minimización de la generación de residuos, para luego llevar a cabo las acciones necesarias para garantizar un destino seguro a los residuos que inevitablemente se generen, fundamentadas en criterios sanitarios, ambientales y económicos.

El carácter integral de la gestión radica en la capacidad de abarcar todo tipo de residuos generados y todas las fuentes de generación. Orientar los esfuerzos de la gestión a un solo tipo o corriente de residuos resulta menos eficiente que adoptar un enfoque global y holístico del sistema (McDougall - White, 2004).

A su vez, los sistemas de gestión de residuos deben contar con la suficiente flexibilidad para soportar variaciones en la cantidad y características de los residuos, además de adaptarse a cambios de las condiciones sociales y económicas que puedan presentarse.

Lograr las metas establecidas en la planificación de la gestión de residuos, requiere establecer metas concretas y bien definidas a corto, mediano y largo plazo, adoptando medidas de cambio en forma progresiva. Difícilmente se logren buenos resultados ante cambios tecnológicos muy pronunciados que no estén acompañados de las medidas adecuadas que aseguren la adaptación al nuevo sistema propuesto.

En este sentido, la GIR debe ser sometida a un proceso de mejora continua con el objetivo de alcanzar sucesivamente niveles más evolucionados de compromiso y adecuación ambiental. Es necesario mantener una rutina de actualización del diagnóstico de la situación y verificación de las acciones efectuadas, determinando la necesidad de reformular las metas y objetivos del plan de gestión. La ampliación del sistema de recolección, la optimización de la operación de los SDF, la implementación de medidas de segregación y tratamiento de residuos, y la adopción de programas de sensibilización de la

población, son algunas de las acciones que pueden surgir del proceso de mejora continua.

La sustentabilidad de un sistema de gestión de residuos urbanos debe contemplar todos los criterios multi y transdisciplinarios (Penido Monteiro, 2006):

- Social: participación, comunicación y educación de la sociedad de forma de generar conciencia sobre las diferentes actividades que forman parte del sistema, así como de los costos asociados a su ejecución.
- Ambiental: desarrollo de tecnologías eficientes para el tratamiento y disposición de residuos, y adecuado control de las mismas de forma de asegurar emisiones mínimas al ambiente y la protección de los recursos naturales.
- Económico-financiero: análisis económico de las opciones de gestión para determinar los costos y beneficios de cada alternativa, y su viabilidad financiera.
- Político-institucional: ejecución de políticas e instrumentos normativos que impulsen la integración y articulación de todos los actores involucrados, delimitando sus responsabilidades, que fomenten el desarrollo de un sistema de gestión eficiente, garantizando su sustentabilidad.
- Técnico operativo: avance en el conocimiento y capacitación, tanto de los técnicos responsables del dimensionamiento como del personal encargado de su operación, en relación a las características de los

sistemas de gestión de residuos, de manera de mejorar las tecnologías aplicadas y el resto de los componentes del sistema.

Una mención aparte merece el aspecto social asociado a la gestión de residuos, el cual es fundamental para el éxito de la misma. El reconocimiento de la propia población como generadores de residuos y la comprensión del papel que juegan en el sistema facilita la cooperación con las autoridades locales en el manejo adecuado de los residuos urbanos. La sensibilización y participación de la población en la gestión de residuos debe reflejarse en la transformación de los patrones de producción y consumo, la reducción en la generación, la adecuación de los residuos para su recolección y la conservación de los espacios públicos.

La comunicación y consulta pública deben aplicarse como instrumentos de apoyo en el diseño y sostenibilidad de las iniciativas propuestas de manejo de residuos. La aceptación del sistema por parte de la población y sus posibilidades de mejora dependen en gran medida del nivel de información y educación que posea la sociedad, por lo que resulta imprescindible mantener frecuentes campañas informativas sobre los beneficios de las nuevas medidas.

Otro gran desafío para una sociedad es la inclusión social de los clasificadores informales de residuos, con la necesidad de formalizar sus actividades y mejorar las condiciones de trabajo (ver II.7 Sector Informal).

Algunas de las principales causas que pueden provocar el fracaso de una gestión de residuos son:

- Carencias en la disponibilidad de información técnica.
- Limitaciones financieras.
- Deficiencias en la capacitación técnica y profesional.
- Limitación normativa e institucional.
- Discontinuidad política y administrativa.
- Ausencia de control ambiental.

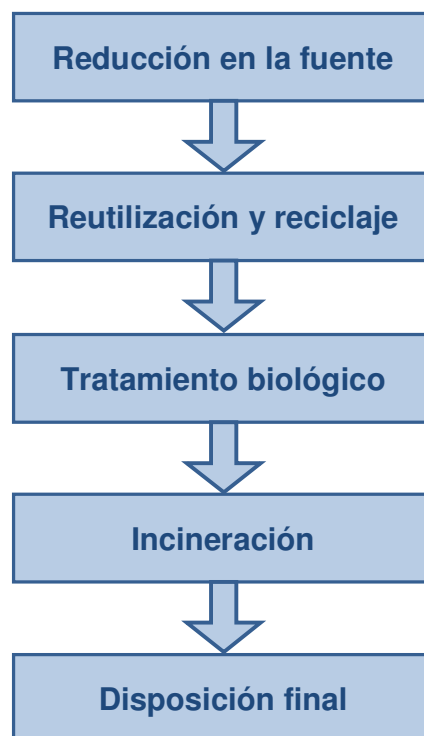
2.4 Orden jerárquico de manejo de residuos

En muchos casos el diseño de la estrategia de gestión de residuos se basa en la jerarquía del manejo de residuos, que establece un orden de prioridades de las operaciones que comprenden el sistema, como el mostrado en la Figura 2.1.

El orden jerárquico de manejo de residuos dispone que hasta que no se agoten los esfuerzos de una de las alternativas, no se debe continuar con la

siguiente. Este está encabezado por la minimización de los residuos generados en la fuente, continuando con las distintas opciones de revalorización de los residuos, y culminando con la disposición final.

Figura 2.1. Orden jerárquico de manejo de residuos.



Si bien la reducción en la fuente es un requisito primario para cualquier sistema de gestión, en el sentido de manejar la menor cantidad de residuos posibles, este aspecto puede considerarse fuera de los límites del sistema de gestión, ya que el alcance del sistema abarca sólo a los residuos que son efectivamente generados. Además, las medidas de reducción en la fuente no

sólo afectan a la cantidad generada, sino también a su composición y naturaleza (McDougall - White, 2004).

En cuanto al resto de las operaciones que componen la jerarquía de prioridades, dado que no considera la posibilidad de integración de las alternativas de gestión, esta herramienta constituye simplemente un lineamiento básico y presenta ciertas restricciones. Bajo este concepto, la recuperación o revalorización de los residuos parecen representar objetivos en sí mismos y no mecanismos necesarios para alcanzar sistemas de gestión eficientes.

Los esfuerzos dirigidos al cumplimiento de metas establecidas de forma rígida, sin justificación técnica y sin considerar características locales, no garantiza necesariamente menores cargas ambientales, y mucho menos sustentabilidad económica, además de impedir la optimización del sistema.

Por estas razones, la GIR requiere mantener una visión holística del sistema, en la cual sean considerados todos los procesos alternativos de gestión y se evalúe su combinación bajo criterios técnicos, ambientales, económicos y sociales de forma de optimizar los resultados en su conjunto.

2.5 Marco de referencia del ACV

Dependiendo del contexto en que se realice el estudio, en algunos casos el ACV puede ser considerado simplemente como un marco conceptual a partir del cual se establecen las bases en relación al desempeño de un sistema; mientras que en otros representa una metodología práctica de evaluación cuantitativa de los distintos aspectos asociados a un producto o servicio (European Environment Agency, 1997).

En ambos enfoques, el ACV representa una poderosa herramienta de gestión ambiental debido a su capacidad de evaluar impactos directos e indirectos en un sistema, así como a la posibilidad de identificar oportunidades de mejora en las fases donde estos impactos ocurren.

Esta metodología se encuentra estandarizada por la Organización Internacional de Estandarización (ISO) a través de la serie de normas internacionales ISO 14040, las cuales han sido adoptadas en nuestro país por el Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). La familia de normas en relación a la herramienta de ACV, cuyos principales elementos se describen en esta sección, incluye:

- UNIT-ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.
- UNIT-ISO 14044:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices.
- ISO/TR 14047. 2nd edition, 2012. Environmental management. Life cycle assessment. Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations.
- ISO/TR 14048. 1st edition, 2002. Environmental management. Life cycle assessment. Data documentation format.
- ISO/TR 14049. 2nd edition, 2012. Environmental management. Life cycle assessment. Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis.

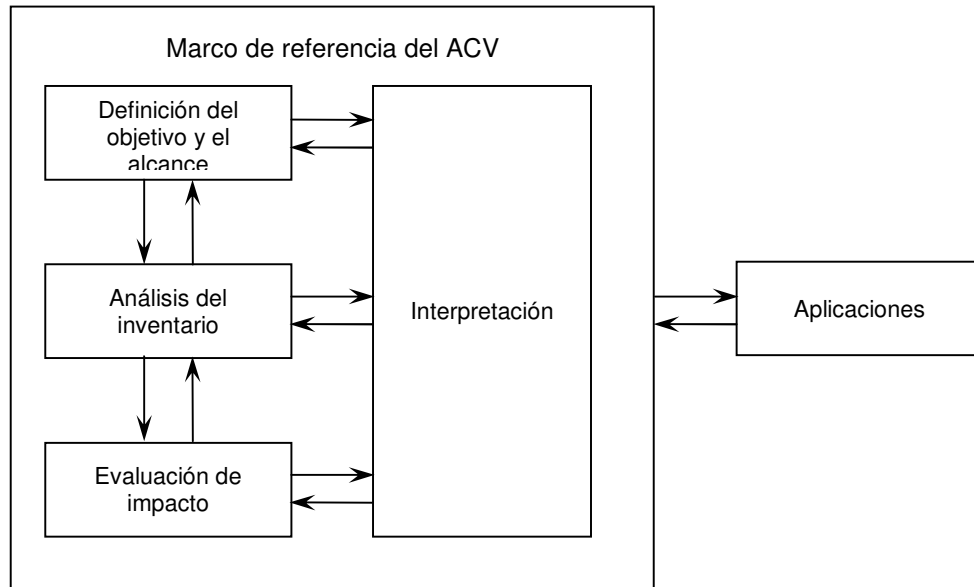
A través del ACV se evalúan los aspectos e impactos ambientales potenciales de un producto o servicio en todo su ciclo de vida; desde la adquisición de materias primas, pasando por su producción y utilización, hasta su disposición final (UNIT-ISO 14040:2006).

Algunas de las aplicaciones directas del ACV son el desarrollo y mejora de productos, ya sea de su desempeño ambiental como de su posicionamiento en el mercado (ecoetiquetado tipo III o Declaraciones Ambientales de Productos), la planificación estratégica y el desarrollo de políticas públicas.

La metodología consiste esencialmente en el balance de masa y energía de un sistema, el cual considera todas las entradas y salidas incluyendo aquellas que se dan de forma indirecta en sistemas secundarios asociados. El carácter espacial y temporal queda implícito en el análisis, dado que se contabilizan todas las entradas y salidas en el ciclo de vida del producto independientemente del momento o ubicación en que éstas ocurren (McDougall - White, 2004).

Los estudios de ACV se componen de cuatro fases, las cuales se muestran en la Figura 2.2, en la cual se ilustra el carácter sistémico e iterativo del análisis.

Figura 2.2. Etapas del ACV.
Fuente: (UNIT-ISO 14040:2006)



La definición del objetivo del ACV debe considerar la aplicación prevista, así como el público a quien está dirigido. El alcance del ACV define el sistema de producto bajo estudio, sus límites y la unidad funcional utilizada. Además, se deben indicar las categorías de impacto seleccionadas y la metodología bajo la cual serán evaluadas.

El sistema de producto se refiere al conjunto de procesos unitarios caracterizado por el desempeño de una o más funciones específicas y que sirve de modelo para el ciclo de vida del producto bajo análisis. Los límites del sistema determinan los procesos unitarios que se encuentran incluidos dentro del análisis, debiendo ser su selección coherente con los objetivos

planteados. Estos procesos se vinculan entre sí mediante flujos de productos intermedios o desechos, con otros sistemas de productos asociados mediante flujos de producto, y con el medio ambiente mediante flujos elementales. Estos últimos se definen como aquellos flujos de materia o energía extraídos del ambiente que no sufren una transformación por el ser humano previa a su ingreso al sistema de producto o posterior a su egreso del mismo (UNIT-ISO 14044:2006).

La unidad funcional define cuantitativamente la característica de desempeño de un sistema de producto, proporcionando una referencia a la cual se relacionan las entradas y salidas, de forma de permitir una adecuada comparación con otros sistemas.

El análisis de Inventario de Ciclo de Vida (ICV) implica la recopilación de los datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar los flujos de referencia del sistema de producto, o sea, las cargas asociadas a los procesos unitarios resultantes de la función desempeñada y en base a la unidad funcional. Los datos necesarios corresponden a todas las entradas y salidas de cada uno de los procesos unitarios del sistema en lo que respecta a energía, materias primas, insumos auxiliares, productos y desechos; emisiones al aire, agua y suelo, y de otros aspectos ambientales. En general, los datos necesarios

pueden provenir de distintas fuentes y referencias, o pueden ser medidos, calculados o estimados.

Los datos requieren ser lo más específicos y representativos posibles para el proceso modelado y los mismos deben ser sometidos a un proceso de validación, de forma de reducir las incertidumbres del estudio. Para ello son utilizados criterios que tomen en cuenta la antigüedad de los datos, la zona geográfica de donde provienen, la tecnología representada, la reproducibilidad de los resultados, etc. Las limitaciones que pueden presentarse en la recopilación de datos deben ser registradas y tenidas en cuenta en la definición del objetivo y el alcance, así como en la evaluación de impactos.

Las entradas y salidas del sistema deben asignarse a los distintos productos de acuerdo a un procedimiento claramente especificado, identificando los procesos compartidos con otros sistemas de producto. El procedimiento más conveniente consiste en la subdivisión del proceso unitario y la recopilación de los datos para estos subprocesos, o ampliar los límites del sistema para incluir las funciones adicionales (UNIT-ISO 14044:2006).

La Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV) implica el análisis de la significancia de los impactos ambientales potenciales del sistema, a partir de la información resultante del ICV. Para ello es necesario seleccionar y definir adecuadamente las categorías de impacto, los modelos de caracterización, y los indicadores que permitan realizar la asignación de los resultados obtenidos en el ICV.

Los juicios adoptados en la definición del modelo de caracterización y la determinación de los indicadores deben ajustarse a un mecanismo ambiental con una base científica. Esto debe realizarse de acuerdo a los objetivos planteados, reflejando un conjunto exhaustivo de los asuntos ambientales relacionados con el sistema bajo estudio.

La interpretación del ciclo de vida proporciona una lectura completa de los resultados de todo el proceso, que permite establecer recomendaciones en la toma de decisiones en base a las conclusiones alcanzadas. Mediante la revisión crítica se verifica si los resultados obtenidos satisfacen los objetivos planteados, o si alguna de las fases del ACV debe ser reformulada, en un proceso iterativo hasta que los objetivos sean alcanzados (European Environment Agency, 1997).

A partir de esta visión global, es posible predecir la carga ambiental potencial de un sistema de producto en relación a una unidad funcional. Si bien no garantiza la selección de una opción ambientalmente mejor, esta herramienta permite la comparación entre las ventajas y desventajas de cada una.

2.6 Aplicación del ACV en la gestión de RSU

Si bien el ACV ha tenido un amplio uso principalmente en la evaluación de productos y servicios, en los últimos años se han realizado diversos estudios a nivel internacional enfocados a la gestión de residuos, existiendo diversas experiencias en lo que se refiere al manejo de RSU, así como a algunas corrientes específicas de residuos, como son neumáticos usados, envases, baterías, etc. (Thomas - McDougall, 2005).

La aplicación del ACV a un sistema de GIR permite ampliar el conocimiento de su desempeño ambiental bajo distintos escenarios. De esta manera, se pueden establecer un conjunto de operaciones a través del cual se minimice el consumo de materiales y energía, así como las emisiones al ambiente. Al proporcionar información cuantitativa sobre los aspectos e impactos ambientales potenciales del sistema, el modelo constituye una herramienta de gran utilidad en la toma de decisiones en la búsqueda de oportunidades

de mejora en la estrategia de gestión de residuos (Sánchez *et al*, 2000; Cherubini *et al*, 2009).

En cuanto a los aspectos metodológicos del ACV, la función del sistema de producto se refiere al manejo de los residuos generados en un área determinada. Además, a diferencia de otros estudios en los cuales la unidad funcional se establece generalmente de acuerdo a las salidas del sistema (productos), para los sistemas aplicados a la GIR la unidad funcional se define en relación a las entradas, o sea, a la cantidad de residuos que son generados en un área geográfica dada, en un tiempo determinado y que ingresan al sistema de gestión.

Por esta razón, es necesario contar con una caracterización precisa de los residuos que son considerados en el análisis, ya que de otra forma los resultados obtenidos no son representativos de la realidad y pueden conducir a conclusiones equivocadas.

La definición de los límites del sistema de un ciclo de vida completo requiere que sean incluidos todos los procesos “desde la cuna a la tumba”.

Para el caso de los RSU, la “cuna” es el momento en que estos materiales pierden valor y deben ser desechados por quienes lo generan. Dado que el

estudio pretende dar un enfoque desde el punto de vista del responsable del manejo de los sistemas de gestión, se adopta como inicio el punto cuando los residuos salen de las viviendas y se incorporan al circuito formal de almacenamiento y recolección.

Si bien todas las actividades previas, como pueden ser la reducción en la fuente y tratamiento de residuos en los hogares, se consideran muy importantes respecto al desempeño ambiental global, estas no son incluidas dentro de los límites del sistema, ya que se entiende que el análisis debe realizarse sobre los residuos que son efectivamente generados y requieren ser gestionados. Si estas acciones previas son consideradas dentro del sistema, se modifica tanto la cantidad como la composición de los residuos, variando la unidad funcional y dificultando la comparación de los escenarios planteados.

Además, se asume que las cargas ambientales asociadas al manejo de residuos que la población realiza previo a ingresarlos al circuito formal de recolección, cualquiera sea su tipo, es despreciable frente al resto del sistema y no varía significativamente entre distintos escenarios.

Cabe aclarar que se supone que los residuos que ingresan al sistema, no traen asociadas consigo las cargas ambientales corriente arriba, correspondientes a la producción y consumo de los materiales que componen los residuos (Ekvall *et al*, 2007).

Por otro lado, la “tumba” de los residuos es el momento en que estos se convierten en un material inerte en un SDF, materiales recuperados o en emisiones al aire, agua y suelo. Bajo este concepto, el propio SDF debe ser considerado como una operación unitaria dentro del sistema, en la cual los residuos se transforman, se consume energía e insumos, y se producen emisiones al ambiente.

A través de un ACV es posible diferenciar las cargas ambientales en directas, como aquellas asociadas a las propias operaciones en el manejo de residuos; indirectas, aquellas correspondientes a los insumos que requiere el sistema; y evitadas, siendo estas derivadas de las actividades desplazadas por la recuperación de materiales y energía a partir de los residuos (Arena *et al*, 2003).

De acuerdo a la definición de residuos, estos dejarían de serlo cuando vuelven a adquirir valor, como se da en el caso de los materiales

recuperados que son reintegrados a la industria del reciclaje. Sin embargo, debido a que estos materiales secundarios sustituyen la fabricación de materiales vírgenes, se considera necesario incluir dentro del sistema las cargas ambientales asociadas al reciclaje y descontar aquellas derivadas de la fabricación del material primario cuyo uso reemplazan. Como se indica en la siguiente sección, esto causa ciertas restricciones en el análisis.

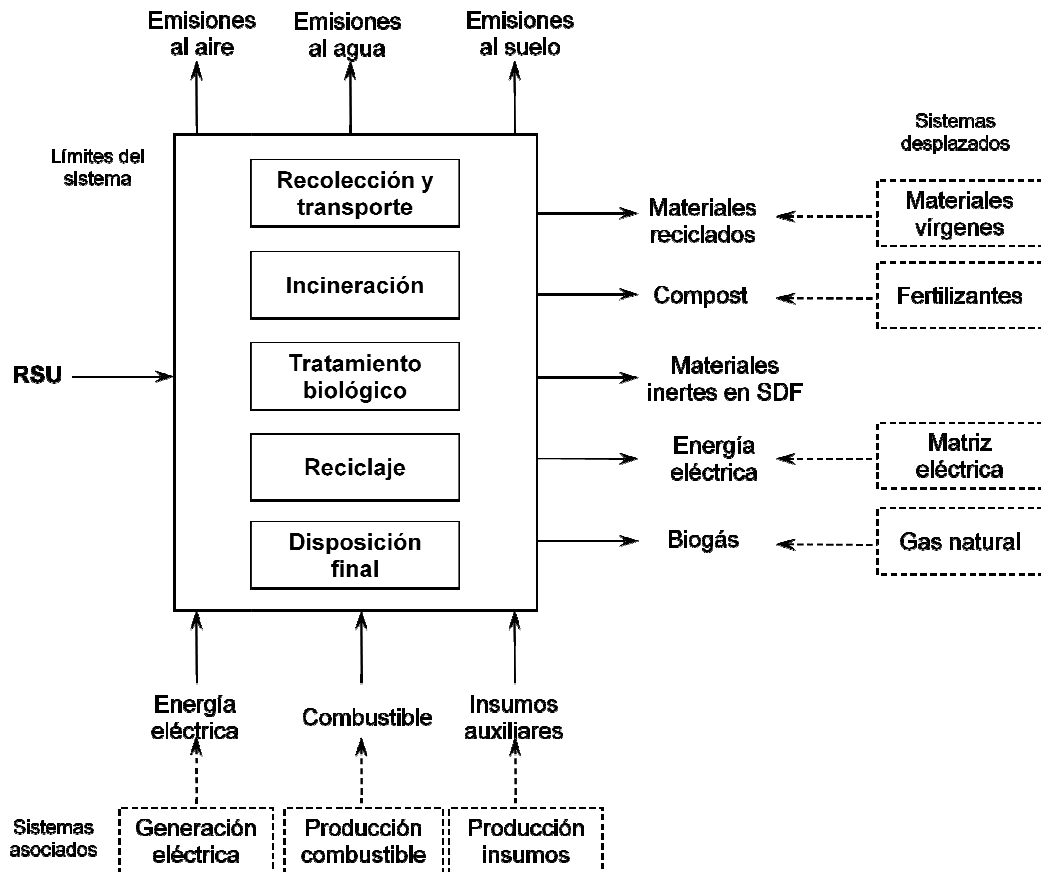
Esto mismo ocurre con la energía generada y exportada desde los sistemas evaluados, por lo que son descontadas las cargas ambientales asociadas a la energía desplazada generada de forma tradicional.

Por otro lado, dado que además de residuos, al sistema también ingresan energía y otros insumos, los límites del sistema se deben ampliar de forma de abarcar las cargas ambientales derivadas de los correspondientes sistemas en un criterio de asignación en base a la unidad funcional del sistema evaluado.

En la Figura 2.3 se muestra un diagrama esquemático que indica los límites del sistema, los procesos unitarios que lo componen, y las entradas y salidas generales, así como los sistemas asociados que son desplazados por la recuperación de materiales y energía.

Figura 2.3. Esquema de los límites del sistema de GIR.

Fuente: elaboración propia.



La etapa de ICV consiste en la determinación de todas las entradas y salidas del sistema, teniendo en cuenta todos los procesos que se encuentran dentro de los límites a considerar. Por lo tanto, el primer paso es la descripción del sistema de gestión de residuos, indicando los distintos tipos de tratamiento y disposición que lo componen, y las tasas de separación de las diferentes corrientes que definen la distribución de flujos entre las operaciones. Luego, se determinan las entradas y salidas de cada proceso unitario expresadas en

base a la cantidad de residuos que ingresan, las cuales dependen de las tecnologías utilizadas y el desempeño de la operación.

La acreditación de las cargas de los sistemas secundarios debe reflejar la situación real en el escenario más habitual. Es decir, deben asumirse las tecnologías normalmente utilizadas en la generación de energía eléctrica y obtención de materiales. Por esta razón, los sistemas deben ser adecuadamente seleccionados y definidos, teniendo en cuenta las características locales.

A partir de los resultados obtenidos en el ICV para todo el sistema se realiza la Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida (EICV), la cual aporta una perspectiva global del sistema en relación a los problemas ambientales. Para ello, son seleccionadas distintas categorías de impacto específicas y a través de modelos de caracterización se calculan los indicadores de impacto.

Es de gran importancia definir una cantidad suficiente de categorías e indicadores de impacto para abarcar todos los objetivos planteados del estudio y no caer en una visión parcial del problema, omitiendo aspectos relevantes. Sin embargo, éstas no deben ser demasiado numerosas de forma de no provocar que el sistema sea inmanejable desde un punto de

vista práctico y presente dificultades en la interpretación (Cherubini *et al*, 2009). Además, las categorías de impacto deben ser independientes una de otra de manera de evitar la doble contabilización de los indicadores (European Environment Agency, 1997).

La visión que adopta el ACV permite diferenciar los impactos de acuerdo al punto en donde éstos ocurren. Es así que los impactos pueden clasificarse como globales, regionales o locales, en relación al área afectada por los mismos.

Por último, debido a las propiedades del ACV y su perspectiva sobre el sistema bajo estudio, la evaluación económica de las alternativas planteadas se ve facilitada. Las estimaciones de los costos asociados a cada una de las operaciones que componen el sistema, así como de aquellos sistemas asociados de forma indirecta, permite obtener un reflejo de los costos que muchas veces es omitido cuando se evalúa la GIR.

2.7 Limitaciones del ACV

Más allá de ser una herramienta de gran utilidad, dada su capacidad de evaluación global y exhaustiva del desempeño ambiental de un producto o servicio, presentando numerosas ventajas frente a otras técnicas, la

metodología de ACV presenta algunas limitaciones que deben ser tenidas en cuenta. La identificación y comprensión de dichas limitaciones, sus características e implicaciones, contribuye a mantener una visión realista sobre su capacidad de análisis y la búsqueda de mejoras en su aplicación.

Es necesario tener presente las restricciones de esta metodología y comprender que la información que genera no es completa, ni absolutamente objetiva ni exacta. Las suposiciones hechas en el estudio, la validación de las fuentes de datos, la asignación de cargas a diferentes sistemas de producto y la modelación de los impactos ambientales, representan decisiones metodológicas cuyos niveles de arbitrariedad requieren reducirse al mínimo para mejorar la transparencia del análisis.

Estas decisiones pueden afectar en mayor o menor medida los resultados obtenidos en la aplicación del ACV a un sistema de producto dado. Por lo que se considera de suma importancia la adecuada justificación y descripción de cada una de las decisiones adoptadas durante el estudio, que contribuya a la transparencia y revisión crítica de los resultados obtenidos. Existen otros aspectos restrictivos de la metodología de ACV que deben ser tenidos en cuenta en el diseño del modelo a ser aplicado, algunos de los cuales se describen a continuación.

Una de las principales desventajas de esta metodología consiste en la incapacidad de diferenciar los impactos reales producidos, de aquellos potenciales que pueden verse afectados por otros factores. Los impactos ambientales dependen de dónde, cuándo y cómo las emisiones son liberadas al ambiente. Una emisión puntual, como puede ser la emisión de la chimenea de una planta de incineración, causa impactos muy diferentes a las emisiones difusas a lo largo de un tiempo prolongado, como se da en un SDF (Finnveden, 1999). La falta de información espacial y temporal en relación a dónde y cómo ocurren las emisiones impide realizar una evaluación precisa de los impactos ambientales realmente potenciales.

La minimización de las incertidumbres de los potenciales impactos respecto a aspectos espaciales, es posible mediante la ponderación de las emisiones de los contaminantes de acuerdo a un factor que refleja la variabilidad espacial según la sustancia contaminante, la fuente de emisión y el ambiente receptor (Ekvall *et al*, 2007).

Un aspecto de gran importancia es la escala de tiempo utilizada para referir los impactos producidos en el sistema estudiado, de manera que pueda asumirse que todas las emisiones determinadas en el ICV son producidas en el mismo momento. Este problema se da principalmente cuando se intenta

comparar las emisiones potenciales en la disposición final, las cuales se dan a lo largo de un período de tiempo muy extendido antes de que los residuos puedan ser considerados inertes, con las derivadas de otros procesos de tratamiento de residuos, que pueden ser consideradas instantáneas o en un corto período de tiempo. En los SDF las emisiones pueden ocurrir durante períodos de tiempo que pueden alcanzar los cientos o miles de años, especialmente para algunos contaminantes específicos como los metales. Existen diferentes visiones de cómo puede ser encarado este asunto en relación a la elección del período de tiempo de referencia cuando se evalúa la disposición final (Finnveden, 1999).

Una posibilidad es considerar las emisiones durante un período de tiempo hasta que la concentración de los contaminantes alcance niveles aceptables. Sin embargo, no siempre resulta sencillo definir cuándo un nivel de emisión es aceptable, ya que existen diversos impactos que ocurren por efectos acumulativos más allá de que se den a bajas tasas de emisión (Finnveden, 1999).

Otra alternativa consiste en asumir el período de tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario en el SDF o adoptar un período de tiempo

hipotético infinito, definido como el tiempo necesario para que se produzcan todas las emisiones desde el SDF (Finnveden, 1999).

En otro sentido, surge una limitación en los casos en los cuales se asume la expansión de los límites del sistema para abarcar el reciclaje de materiales y su correspondiente sustitución de materiales vírgenes.

Incluir la industria del reciclaje requiere suponer que la funcionalidad de los materiales secundarios es la misma que la de los materiales vírgenes (asignación de ciclo cerrado⁴), lo cual en la mayoría de los casos no sucede, ya que los materiales secundarios suelen ser de menor calidad y destinados a la fabricación de otros tipos de productos distintos que los materiales vírgenes (McDougall - White, 2004).

A su vez, dado que muchos procesos de fabricación de materiales vírgenes (aluminio, papel, vidrio, etc.) requieren la inclusión de materiales recuperados, el proceso de sustitución debe asumir una asignación de cargas ambientales para cada material, virgen y recuperado, de manera diferenciada. En la mayoría de los casos esto no es posible y los datos sólo

⁴ El procedimiento de asignación de ciclo cerrado para el reciclaje supone que dicho proceso se realiza dentro de los límites del sistema de producto bajo estudio y que los materiales reciclados desplazan a los materiales primarios sin alteraciones en sus propiedades inherentes.

pueden estimarse a través de un procedimiento de extrapolación en base a alguna propiedad de cada material (asignación de ciclo abierto⁵).

Además, el hecho de incluir los materiales recuperados y su reciclaje dentro de los límites del sistema, provoca que sea necesario considerar que el mercado para éstos posee la suficiente capacidad como para incorporar todos los materiales recuperados, lo cual no siempre puede ser la situación real.

Otro aspecto que muchas veces es omitido y puede generar conclusiones no del todo precisas, corresponde al hecho que algunas operaciones son comandadas por relaciones no lineales. Éste es el caso, por ejemplo, de la recolección y transporte de residuos, cuyas cargas ambientales asociadas aumentan en forma no lineal a tasas de reciclaje elevadas o cuando se consideran zonas de recolección poco pobladas distanciadas del resto de los circuitos de recolección. Si este aspecto no es tenido en cuenta y se adopta la linealidad del modelo, éste no posee la capacidad de evaluar ciertos escenarios como, por ejemplo, la determinación de la tasa óptima de reciclaje (Ekvall *et al*, 2007).

⁵ El procedimiento de asignación de ciclo abierto para el reciclaje supone que dicho proceso se realiza en otro sistema de producto y que los materiales reciclados sufren alteraciones en sus propiedades inherentes.

Por último, cabe mencionar que el ACV no cubre aspectos de salud pública, higiene ni seguridad en los procesos. Si bien son incluidos algunos factores de riesgo, como son la emisión de metales u otros contaminantes, no son considerados factores patogénicos ni ecotoxicológicos en un análisis de la relación dosis-respuesta, lo cual limita la capacidad del modelo en evaluar este tipo de impactos (Arena *et al*, 2003).

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU EN EL AMM

3.1 Introducción

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la sistematización, caracterización y análisis de la generación de RSU en el AMM. En el ANEXO I se detallan las principales características del área bajo estudio y los distintos aspectos vinculados a la gestión actual de los residuos.

Esta caracterización, especialmente en lo que se refiere a la cantidad y composición, se realiza con el objetivo de establecer el flujo de entrada de residuos a los sistemas de gestión a evaluar planteados. Además, es de gran importancia en la selección de las tecnologías con posibilidad de ser aplicadas, así como para evaluar la viabilidad de su implementación.

Por otro lado, el conocimiento de las particularidades del sistema de gestión permite identificar aquellos problemas existentes y las medidas que requieren ser adoptadas para dar solución a estos aspectos. Esto es esencial en la búsqueda de alternativas que estén en concordancia con la realidad del sector, evitando plantear alternativas que por algún factor no sea posible su aplicación o facilitando la superación de las barreras que lo impiden.

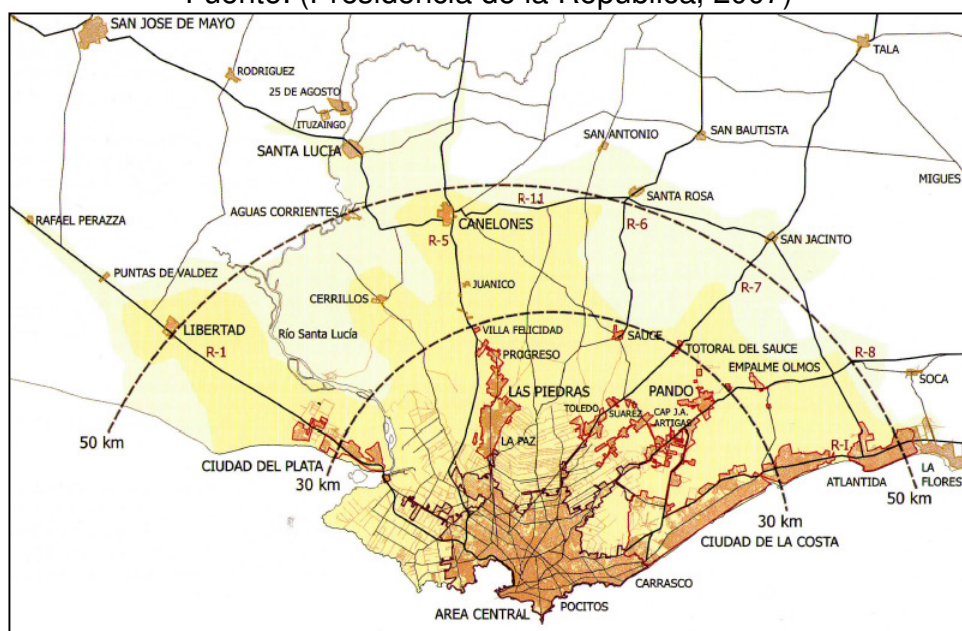
3.2 Características del AMM

El AMM se ubica en el centro-sur del Uruguay y comprende todas las zonas urbanas que se encuentran próximas a la ciudad de Montevideo, abarcando totalmente el departamento de Montevideo, y parte de los departamentos de Canelones y San José.

La definición del AMM utilizada en el presente estudio establece la zona abarcada dentro de un radio de aproximadamente 30 km desde el centro de Montevideo, conformando la primera corona metropolitana (Presidencia de la República, 2007). En la siguiente figura se muestra el mapa del AMM, con las coronas metropolitanas definidas y las principales localidades que la conforman.

Figura 3.1. Mapa de delimitación del AMM.

Fuente: (Presidencia de la República, 2007)



De acuerdo al último censo realizado en nuestro país en el año 2011 por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE)⁶, la población total correspondiente al AMM alcanza aproximadamente los 1.670.000 habitantes, representando el 51 % de la población total del país. De la población total del AMM, el 79 % corresponde al departamento de Montevideo, 19 % al departamento de Canelones y el restante 2 % al departamento de San José.

⁶<http://www.ine.gub.uy/censos2011/index.html>

Tabla 3.1. Población del AMM por departamento según Censo 2011.

Fuente: <http://www.ine.gub.uy/censos2011/index.html>

Departamento	Población	Viviendas
Montevideo	1.319.108	520.538
Canelones	314.293	114.254
San José	31.146	11.245
Total AMM	1.664.547	646.037
Total país	3.286.314	1.389.740

Según los datos del censo anterior (Censo 2004 – Fase I), la tasa de crecimiento de la población desde el año 2004 a la actualidad ha sido muy baja, ubicándose para Montevideo en el -0,07 %, mientras que para Canelones y San José son del 0,68 y 0,19 %⁷, respectivamente.

3.3 Generación de RSU en el AMM

El diagnóstico respecto a la generación de residuos fue realizado en base al procesamiento de la información ya existente y a entrevistas realizadas a algunos de los actores clave involucrados. En especial, se adoptan como punto de partida los Estudios Básicos del Plan Director de Residuos Sólidos (PDRS) de Montevideo y Área Metropolitana (FICHTNER-LKSur, 2004), elaborado a partir de datos recabados durante el año 2003. Si bien esta información se encuentra desactualizada, dicho informe continúa aún siendo utilizado como referencia, ya que cuenta con un estudio exhaustivo sobre el

⁷ Las tasas de crecimiento indicadas para Canelones y San José corresponden al total departamental y no para las localidades ubicadas dentro del AMM.

escenario en relación a la generación de residuos y una visión integral de su gestión. Esta información es complementada con otros informes que han sido elaborados posteriormente.

De acuerdo a estos estudios, en el año 2003 la generación total de RSU en el AMM alcanzaba las 1.957 toneladas diarias, lo que equivale a aproximadamente 715 mil toneladas anuales, de las cuales 86 % corresponden al departamento de Montevideo.

En cuanto al origen y destino de los residuos generados, la cantidad de residuos sólidos con destino a los SDF del AMM alcanzaba un valor de 489.235 ton/año, representando el 68 % del total de los residuos generados. Dentro de estos, el 52 % correspondía a la recolección formal de RSDPG, el 25 % a recolección de descartes, el 10 % a barrido y limpieza, y el resto se repartía entre grandes generadores y otros orígenes no especificados. Los residuos generados que no ingresaban al SDF correspondían a los residuos recuperados para reciclaje (27 % del total) y residuos con disposición final inadecuada (5 % del total).

Debido a que la recuperación de residuos por el sector formal y por grandes generadores era realizada a partir de sistemas consolidados, y que

actualmente continúan operando en forma adecuada y sostenible, estos residuos pueden no ser considerados en los propósitos de evaluación de distintas alternativas de gestión que se realiza en los capítulos posteriores.

Esta observación no se aplica a los materiales recuperados por el sector informal, los cuales requieren ser incluidos en la corriente de residuos que ingresan a los sistemas de gestión a evaluar, ya que las condiciones en que este sector opera son inaceptables y se considera que estas actividades deben ser discontinuadas (ver I.7 Sector Informal). Se asume la ejecución de las medidas necesarias para la formalización de dichas actividades, de forma de que estos residuos puedan ingresar a los sistemas de gestión propuestos.

Por lo tanto, incluyendo todos los residuos recolectados por el sector formal e informal, y los generados a partir de las operaciones de barrido y limpieza, se considera que la cantidad de RSU generados en el AMM que pueden ser ingresados a los sistemas de gestión a ser evaluados alcanza un valor de **677.075 ton/año**. Como ya fue mencionado, no son tenidos en cuenta los materiales recuperados por el sector formal y grandes generadores.

En cuanto a la composición de los residuos, en la siguiente tabla se muestra la composición y las cantidades de cada material de la corriente de RSU

efectivamente generados. Como se especifica más adelante en el presente informe, éstos corresponden al flujo de residuos que ingresan a los sistemas de gestión planteados a evaluar (ver 4.3 Función y unidad funcional).

Tabla 3.2. Composición y cantidades generadas de RSU generados en el AMM.

Fuente: elaboración propia a partir del procesamiento de datos del PDRS (FICHTNER-LKSur, 2004)

Fracción	Cantidades generadas	Composición
	(ton/año)	(% en peso)
Papel y cartón	104.133	15,4
Vidrio	19.248	2,8
Metales ferrosos	29.765	4,4
Metales no ferrosos	6.516	1,0
Plásticos rígidos	22.840	3,4
Plásticos laminados	47.620	7,0
Materiales orgánicos	340.992	50,4
Textiles	10.204	1,5
Residuos verdes	28.831	4,3
Otros	66.927	9,9
Total	677.075	100,0

3.4 Conclusiones del diagnóstico de la gestión de RSU en el AMM

De acuerdo a las observaciones realizadas sobre la gestión actual de RSU en el AMM (ver ANEXO I), se puede concluir que ésta representa un sistema ineficiente desde el punto de vista de la revalorización de los residuos y que es causante de importantes impactos ambientales y cuyos controles no

alcanzan a ser totalmente eficientes en relación a los niveles de afectación al medio ambiente.

Además, el elevado volumen de residuos que se destina a disposición final, continúa agravando los problemas relacionados al hecho de que la mayoría de los SDF existentes se encuentran actualmente en los límites de su vida útil y a la falta de opciones para la implantación de nuevos SDF.

Por otro lado, si bien existen ciertos programas destinados a la clasificación y recuperación de materiales, algunos ya consolidados y otros en pleno desarrollo, las actividades de los clasificadores informales aún continúa constituyendo la base en la revalorización de materiales. Dadas las condiciones de trabajo de éstos y los problemas ambientales que son causados, se considera que los esfuerzos de la administración deben enfocarse en el control y erradicación de este tipo de actividades informales. La implantación de sistemas sostenibles de recuperación de materiales de los residuos requiere intensificar las campañas de difusión y concientización con el fin de alcanzar mayores niveles de participación de la población.

4. ALCANCE DEL ACV

4.1 Introducción

En la presente sección se describen los aspectos relacionados con el alcance del ACV aplicado a los sistemas de gestión de RSU. Se definen la unidad funcional y los límites del sistema, que constituyen la base a partir de la cual se establecen los procesos unitarios incluidos en cada sistema y la aplicabilidad de los escenarios alternativos planteados.

Además, se establecen las diferentes categorías de impacto y otros indicadores utilizados en la interpretación de los resultados del modelo de ACV aplicado a los sistemas y escenarios propuestos.

En secciones anteriores fueron presentadas las bases conceptuales que introducen las principales nociones respecto a la metodología de ACV a partir de las cuales se desarrollan sus distintos componentes (ver 2.6 Aplicación del ACV en la gestión de RSU).

4.2 Función y unidad funcional

En el caso en estudio, la función del sistema corresponde al manejo de forma adecuada de los RSU a través de distintas operaciones de tratamiento y disposición que aseguren la protección al medio ambiente y a la salud de la

población. Por su parte, la unidad funcional es la cantidad de RSU que son generados anualmente en el AMM y que ingresan al sistema de gestión bajo estudio.

Como ya fue mencionado, los RSU que son considerados y que definen la unidad funcional de los sistemas a evaluar abarcan la totalidad de los residuos que ingresan actualmente a los SDF, los residuos recuperados por el sector informal y los descartes dispuestos inadecuadamente, de acuerdo a la caracterización realizada en la sección anterior.

Para simplicidad del sistema, se redondea la generación de residuos a ser considerada en 700.000 ton/año con la misma composición que fue determinada. En la siguiente tabla se muestra la cantidad de las distintas fracciones de residuos que definen la unidad funcional del análisis de los sistemas de gestión a ser evaluados.

Cabe mencionar que también son evaluados distintos escenarios en los cuales se plantea un cambio de la composición de los residuos que ingresan al sistema (ver 4.4.5 Variación de la composición).

Tabla 4.1. Cantidad y composición de los residuos a considerar en los sistemas a evaluar.

Fracción	Composición	Cantidades generadas
	(% en peso)	(ton/año)
Papel y cartón	15,4	107.800
Vidrio	2,8	19.600
Metales ferrosos	4,4	30.800
Metales no ferrosos	1,0	7.000
Plásticos rígidos	3,4	23.800
Plásticos laminados	7,0	49.000
Materiales orgánicos	50,4	352.800
Textiles	1,5	10.500
Residuos verdes	4,3	30.100
Otros	9,8	68.600
Total	100,0	700.000

Dado que el presente estudio consiste en un análisis prospectivo, el año de referencia seleccionado corresponde al 2015. De esta manera, se asume que la cantidad y composición de los residuos corresponde a los datos presentados en los Estudios Básicos del PDRS (FICHTNER-LKSur, 2004), mientras que se adopta la matriz energética proyectada por la DNE a partir de dicho año (ver 5.3 Combustibles y energía eléctrica).

4.3 Límites del sistema

En el presente trabajo los sistemas propuestos surgen de una combinación de distintas alternativas basadas en cuatro procesos unitarios principales:

disposición final, incineración, tratamiento biológico y reciclaje (ver 4.4 Definición de los sistemas de gestión a estudiar).

En cuanto a los límites de los sistemas, éstos se consideran desde que los residuos son ingresados al circuito formal de recolección, ya sea por parte de la población y otros pequeños generadores a través del sistema de contenedores, u otros tipos de fuentes, como puede ser el servicio de barrido y limpieza; hasta que se transforman en materiales inertes en el SDF, materiales recuperados y reciclados, y en emisiones al aire o agua.

Por otro lado, existen otros sistemas secundarios asociados que deben ser considerados en el ciclo de vida del sistema de producto analizado (extensión de los límites del sistema), mediante lo cual se adicionan o descuentan los ICV asociados a insumos y productos, según sea el caso. Entre los sistemas desplazados se pueden mencionar la producción de materiales vírgenes y fertilizantes sintéticos, sustituidos por materiales reciclados y bioabono, respectivamente; mientras que los sistemas adicionales que deben incluirse se encuentra la energía consumida y otros materiales utilizados.

Cabe mencionar que en el presente estudio no son consideradas las operaciones unitarias secundarias (indirectas) correspondientes a la fabricación y construcción de equipos e infraestructura utilizada en el sistema de producto, ya que se asume que estas son despreciables si son referenciadas respecto a la unidad funcional (McDougall - White, 2004).

4.4 Definición de los sistemas de gestión a estudiar

A continuación se definen los sistemas de gestión de RSU a ser evaluados por la aplicación del modelo de ACV desarrollado, así como los distintos escenarios bajo los cuales se realiza el estudio. Para ello es necesario establecer los procesos unitarios que son incluidos dentro de cada sistema, como se articulan entre sí y la forma en que se distribuye el flujo de residuos entre éstos en cada escenario planteado.

Los criterios de selección de los sistemas y escenarios, se basan en la posibilidad de revalorización de los residuos a través de las tecnologías disponibles. De esta manera, partiendo de un escenario basado únicamente en la disposición final de residuos, se incorporan progresivamente distintas tecnologías de tratamiento de residuos y se definen los posibles escenarios para cada uno de los sistemas. A su vez, se tienen en cuenta los estudios que los diversos actores involucrados han llevado a cabo en relación al

análisis de factibilidad en la implementación de medidas alternativas en el sistema de gestión de residuos.

Como ya ha sido comentado anteriormente, una de las alternativas que con mayor fuerza ha sido analizada por las autoridades nacionales corresponde a la revalorización energética mediante incineración con recuperación de energía para la generación eléctrica (Themelis - Diaz, 2012). Debido a la necesidad de ampliación y diversificación de la matriz energética como parte de la política nacional, y al relativamente elevado contenido en los residuos de materiales con un alto poder calorífico, la transformación energética de los residuos surge como una opción de gran interés. Por lo tanto, la incineración es seleccionada como la tecnología utilizada en todos los sistemas para el tratamiento de la totalidad de los residuos que no son clasificados.

Sin embargo, esta tecnología impide la recuperación de materiales evitando su reutilización y reciclaje, lo cual atenta contra la conservación de recursos y afecta el trabajo de numerosas personas dedicadas a la clasificación de residuos. Es así que se incluye la posibilidad de separar en origen aquellos materiales con potencial de ser recuperados y las operaciones de reciclaje correspondientes.

Por último, dado el importante contenido de materiales orgánicos biodegradables en los residuos, la alternativa de tratamiento biológico de esta fracción resulta, en principio, atractiva. Si bien por el momento esta tecnología no ha presentado mayor interés por parte de las autoridades, de esta manera es posible obtener compost y biogás como subproductos del tratamiento, además de mejorar las condiciones del tratamiento térmico debido al retiro de materiales de bajo poder calorífico de los residuos a incinerar. Por esta razón, se agrega la oportunidad de separar en origen la fracción orgánica de los residuos para su envío a una planta de tratamiento biológico.

Dado que la disposición final de residuos, además de provocar diversos problemas respecto a su operación y control, imposibilita prácticamente cualquier tipo de revalorización de los residuos, a excepción del aprovechamiento del biogás, esta tecnología no forma parte de los sistemas a evaluar más allá de la modelación del escenario base y la disposición de los residuos provenientes del resto de los procesos de tratamiento planteados.

Más adelante se describen cada uno de estos procesos unitarios, detallando las principales características en relación tanto a su desempeño operativo como ambiental (ver 5. Descripción de los procesos unitarios).

Se hace necesario en este momento introducir el concepto de Escenario Principal que es utilizado para fijar los sistemas a evaluar. Para cada sistema propuesto, si bien son analizados diversos escenarios posibles, se determina un Escenario Principal a partir del cual se definen los sistemas subsiguientes. Los criterios para la definición de este escenario pueden variar dependiendo de cada caso, pudiendo basarse en las tasas asumidas de separación de residuos, el desvío de alguna fracción a un proceso secundario, la variación de las propias características de las operaciones unitarias incluidas en un sistema, o la utilización de los subproductos del sistema para distintas finalidades.

En la Tabla 4.2 se resumen los sistemas y escenarios a evaluar, los cuales se describen en las siguientes secciones.

Tabla 4.2. Resumen de los sistemas y escenarios a evaluar.

Sistemas	Procesos Unitarios	Escenarios	Nomenclatura
Sistema 0 (S0)	Disposición Final	EP: totalidad de los residuos enviados a SDF sin recuperación de biogás	S0_EP
		E1: variación de la tasa de recuperación de biogás hasta alcanzar el 90 % para quema en antorcha	S0_E1
		E2: recuperación del 90 % del biogás para generación de energía eléctrica	S0_E2
		C0: ídem al EP pero adoptando la composición de los residuos según la Tabla 4.4	C0
Sistema 1 (S1)	Incineración Disposición Final	E1: variación de la tasa de desvío de residuos del SDF hacia la planta de incineración hasta alcanzar el 100 %	S1_E1
		EP: totalidad de los residuos enviados a incineración	S1_EP
		E2: recuperación del 90 % de los metales ferrosos de las cenizas del incinerador	S1_E2
		C1: ídem al EP pero adoptando la composición de los residuos según la Tabla 4.4	C1
Sistema 2 (S2)	Reciclaje Incineración Disposición Final	E1: variación de la tasa de separación en origen de la fracción seca hasta alcanzar los valores de la Tabla 4.3	S2_E1
		EP: recuperación y reciclaje de la fracción seca según los valores de separación en origen de la Tabla 4.3	S2_EP
		E2: aumento de la tasa de separación en origen hasta alcanzar el 75 % para papel y cartón, y el 60 % para plásticos	S2_E2
		C2: ídem al EP pero adoptando la composición de los residuos según la Tabla 4.4	C2
Sistema 3 (S3)	Tratamiento Biológico Reciclaje Incineración Disposición Final	E1: variación de la tasa de separación en origen de la fracción húmeda hasta alcanzar el 30 %	S3_E1
		EP: recuperación y tratamiento biológico de la fracción húmeda para una separación en origen del 30 %, con utilización de la totalidad del biogás para generación eléctrica y el compost como bioabono	S3_EP
		E2: desvío del compost hacia el SDF	S3_E2
		E3: aumento de la separación en origen de la fracción húmeda hasta alcanzar el 50 %	S3_E3
		C3: ídem al EP pero adoptando la composición de los residuos según la Tabla 4.4	C3

4.4.1 Sistema 0

En el Sistema 0 se considera como único proceso unitario la disposición final en relleno sanitario de la totalidad de los residuos (fracción mixta). De esta manera, la tasa de recuperación de materiales por separación en origen es nula.

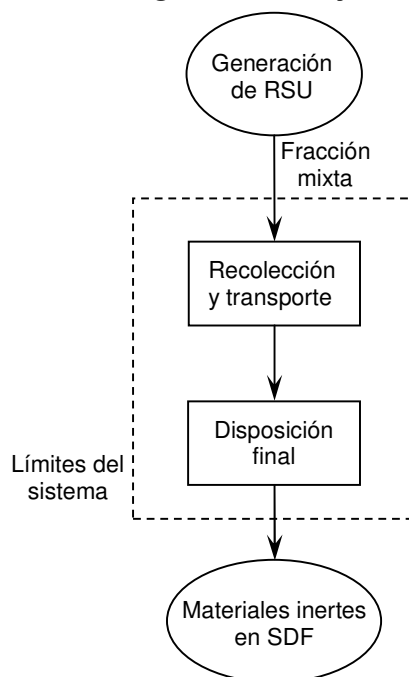
Se adopta el actual sistema de recolección en contenedores y transporte de residuos en camiones compactadores, considerando el SDF existente de Felipe Cardoso.

El Escenario Principal planteado (S0_EP) consiste en la disposición final sin recuperación de biogás, basando el resto de los sistemas a evaluar en este escenario para el proceso unitario de disposición final. Este escenario representa la línea de base, ya que se asemeja a la situación actual respecto al manejo de residuos si se asume que esta se basa fundamentalmente en la disposición final. Por esta razón, la definición de este sistema es de gran importancia en la comparación con los restantes sistemas analizados.

Por otro lado, se analizan dos escenarios de recuperación de biogás. En primer lugar, se evalúa la quema en antorcha, variando la tasa de

recuperación de biogás de 0 a 90 % del total generado (S0_E1). Además, se evalúa el escenario de generación de energía eléctrica para una tasa de recuperación de biogás del 90 % (S0_E2).

Figura 4.3. Diagrama de flujos del Sistema 0⁸.



Si bien no se incluye en el presente estudio, otro escenario posible corresponde a la recolección y purificación del biogás para la producción de biometano, para su inyección a la red de distribución de gas natural o su uso como combustible automotor.

⁸ Para simplificar el esquema de los diagramas de flujos de los sistemas a evaluar, no se incluyen dentro de los límites de los mismos los sistemas secundarios asociados.

4.4.2 Sistema 1

Al igual que en el sistema anterior, en el Sistema 1 se adopta una tasa de recuperación de materiales por separación en origen igual a cero, aunque en este caso se agrega el proceso unitario de incineración.

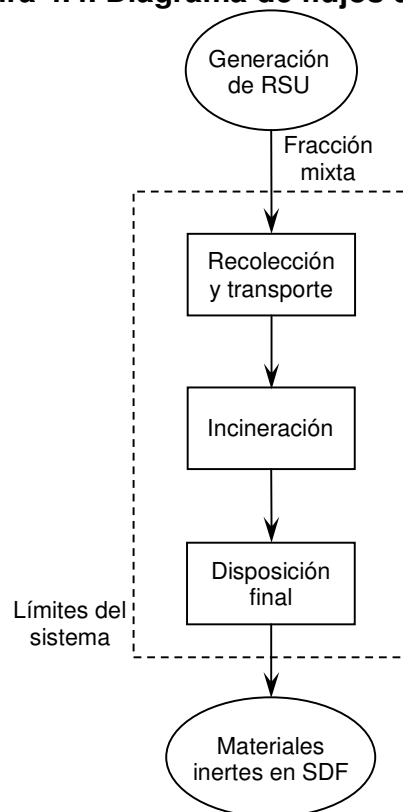
Se considera que el sistema de recolección y transporte de residuos es el mismo al actual, mientras que se asume que la planta incineradora se encuentra ubicada en el propio predio de Felipe Cardoso, en las inmediaciones del SDF donde son enviadas para su disposición las cenizas resultantes de la incineración, asumiendo mínimo el transporte de las mismas.

La totalidad de la energía liberada en la incineración es utilizada en la generación de energía eléctrica, la cual es consumida en parte en la propia planta de incineración y el resto exportada a la red.

El Escenario Principal (S1_EP) consiste en la suposición de que la totalidad de los RSU generados son conducidos a incineración, mientras que por otro lado se estudia como se da el pasaje del Sistema 0 al Sistema 1, variando la tasa de residuos que son desviados directamente al SDF (S1_E1).

Por otro lado, para el caso en que la totalidad de los residuos son enviados a incinerar, se evalúa el escenario de recuperación del 90 % de los metales ferrosos presentes en las cenizas del incinerador (S1_E2). Para este escenario, si bien no existe separación en origen, la tasa global de recuperación de materiales deja de ser nula. Para ser estrictos, es posible decir que se incluye aquí el proceso de reciclaje, aunque para mantener el orden en el planteo de los sistemas a evaluar, se deja este proceso para ser presentado en el siguiente sistema.

Figura 4.4. Diagrama de flujos del Sistema 1.



4.4.3 Sistema 2

El Sistema 2 incorpora la posibilidad de separar materiales en origen para su recuperación y reciclaje, conformando así una fracción seca que es enviada en primer lugar a una planta de clasificación, donde los distintos materiales son acondicionados, para luego ser conducidos a sus respectivas plantas de reciclaje. Los materiales incluidos en la fracción seca con posibilidad de ser clasificados en origen son: papel y cartón, vidrio, metales ferrosos, metales no ferrosos, plásticos rígidos y plásticos laminados.

Por su parte, la fracción mixta, o sea, los materiales no clasificados, son enviados en su totalidad a la planta de incineración.

Se propone un sistema de recolección de la fracción seca en el cual los residuos clasificados y separados en origen son depositados en contenedores específicos para cada uno de los materiales, los cuales se ubican en distintos puntos estratégicos de la ciudad. La recolección se realiza mediante camiones abiertos de carga manual o con guinches, dependiendo el caso.

Es así que se define una tasa de recuperación por separación en origen para cada uno de los materiales que componen los RSU generados, la cual establece la cantidad de materiales reciclados.

El Escenario Principal (S2_EP), el cual representa la base para la definición del resto de los sistemas que incluyan la posibilidad de separación de una fracción seca, propone la tasa de separación en origen detallada en la Tabla 4.3, la cual surge a partir de las cantidades de residuos clasificados por el sector informal de acuerdo al PDRS (FICHTNER-LKSur, 2004). También se incluyen aquí, las tasas de descartes de los distintos materiales en la planta de clasificación, las cuales surgen de la posibilidad de que estos materiales se encuentren contaminados y no cumplan los requisitos necesarios para ser reciclados, por lo que son incorporados a la fracción mixta.

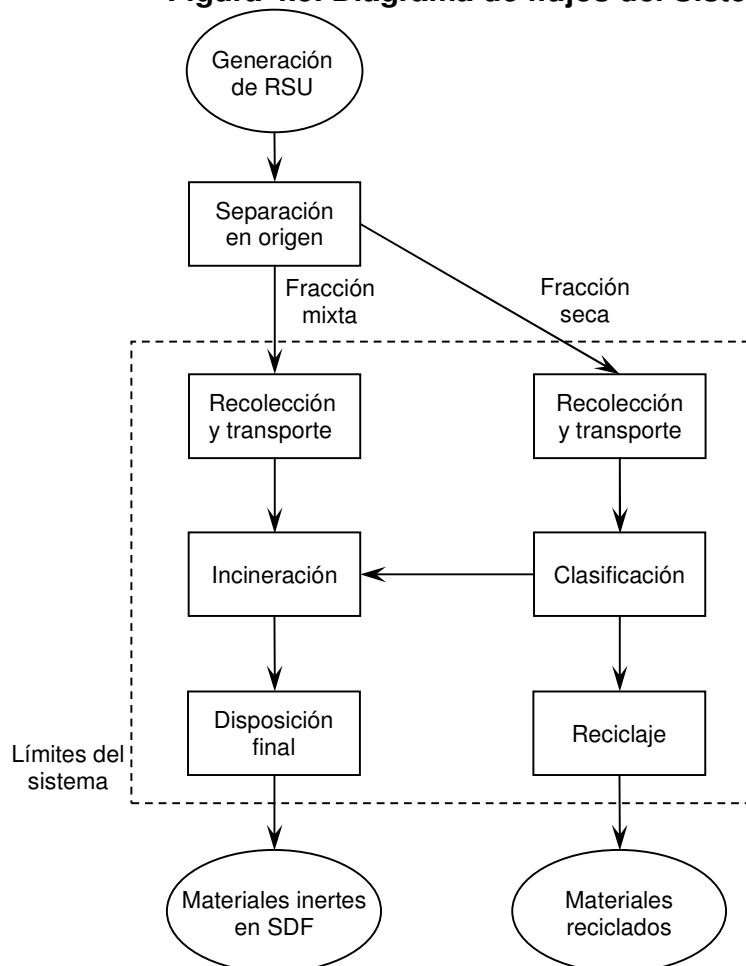
Tabla 4.3. Tasas de separación en origen para los materiales que conforman la fracción seca en el escenario principal del Sistema 2.
(en base al total de los materiales presentes en los RSU generados)

Material	Tasa de separación en origen	Tasa de descarte en planta de clasificación
	(%)	(%)
Papel y cartón	50	10
Vidrio	20	10
Metales ferrosos	75	0
Metales no ferrosos	80	0
Plásticos rígidos	20	10
Plásticos laminados	20	10

Por otro lado, se plantean distintos escenarios, los cuales evalúan el pasaje del Sistema 1 al Sistema 2 (S2_E1) mediante la variación de las tasas de separación en origen para el conjunto de todos los materiales hasta alcanzar el escenario principal. De esta manera, se pretende analizar los efectos que puedan tener las políticas de información y concientización de la población respecto a la clasificación de residuos en el sistema de gestión.

Además, dado que los precios de los materiales reciclables tanto de papel y cartón como de plásticos, son los que han manifestado mayores oscilaciones en los últimos tiempos (ver I.8 Mercado de materiales reciclables), se plantea el escenario de alcanzar tasas de separación en origen de hasta el 75 % para papel y cartón y del 60 % para plásticos (S2_E2).

Figura 4.5. Diagrama de flujos del Sistema 2.



4.4.4 Sistema 3

En el Sistema 3 se agrega la posibilidad de separar en origen los materiales orgánicos biodegradables (fracción húmeda), para ser enviados a una planta de tratamiento biológico para la producción de compost, a través de una nueva tasa de separación en origen para dicha fracción.

Se considera que la recolección se realiza a través de contenedores especiales ubicados en la acera, junto a los correspondientes para la fracción mixta; mientras que para el transporte son utilizados camiones compactadores. La planta de tratamiento biológico consiste en un primer proceso anaerobio y una posterior estabilización aerobia, la cual se ubica en el mismo predio que el SDF de Felipe Cardozo.

El Escenario Principal (S3_EP) plantea una tasa de separación en origen de la fracción húmeda del 30 %, manteniendo el resto del sistema igual al escenario principal del Sistema 2. Se introduce además una tasa de descarte de materiales del 10 % respecto a los materiales separados, los cuales se incorporan a la fracción mixta y son enviados a incineración.

Se asume que en el escenario principal, el compost producido es de buena calidad y es utilizado como bioabono, mientras que el biogás generado es utilizado en su totalidad para la generación de energía eléctrica mediante cogeneración, con aprovechamiento de la energía térmica para la calefacción del digestor.

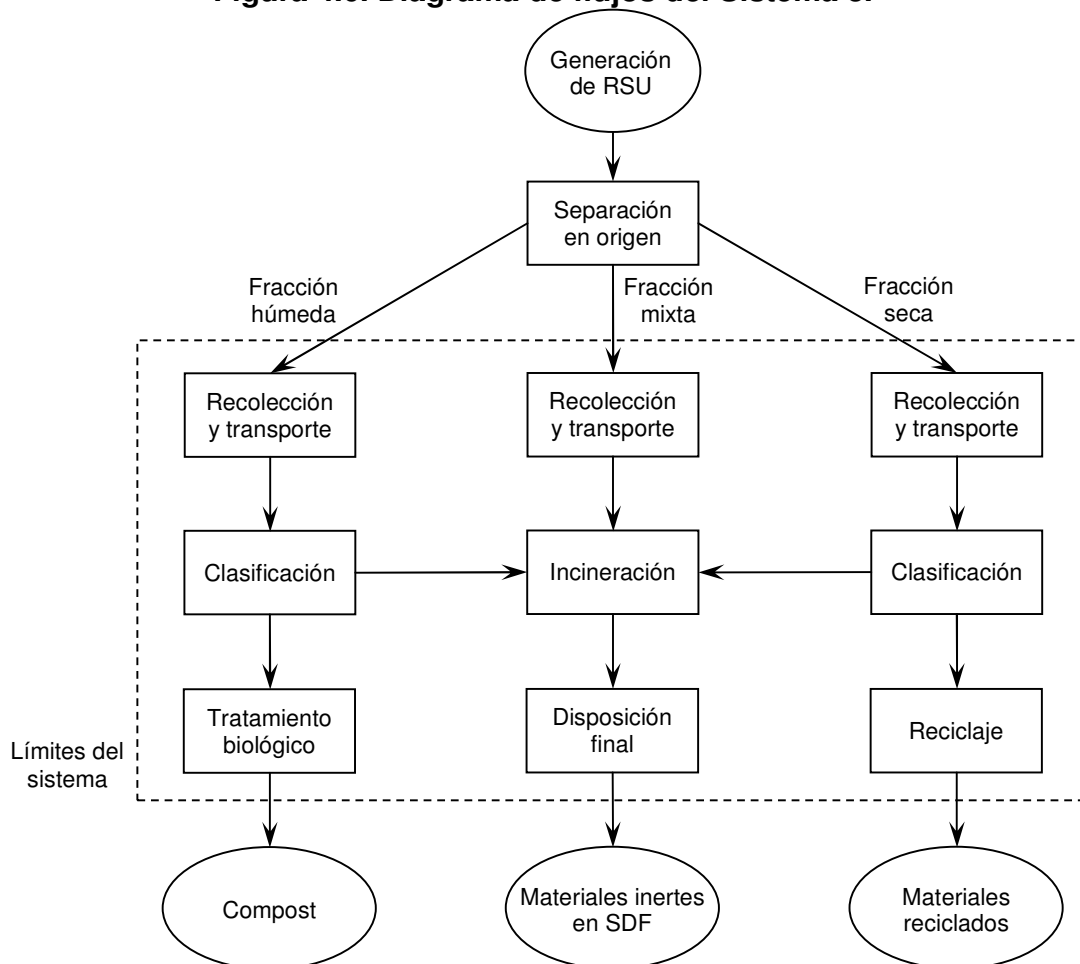
Para evaluar como se da el pasaje del Sistema 2 al Sistema 3, se plantea la variación de la tasa de separación en origen de la fracción húmeda (S3_E1).

Otro escenario estudiado incluye la posibilidad de enviar el compost producido al SDF (S3_E2), lo cual puede deberse a una mala calidad del mismo o a una reducida demanda para su uso como bioabono.

El último escenario estudiado asume un aumento en la tasa de recuperación de materiales orgánicos hasta alcanzar una separación en origen del 50 % (S3_E3).

Al igual que para el Sistema 0, otro escenario posible corresponde a la recolección y purificación del biogás para la producción de biometano, para su inyección a la red de distribución de gas natural o su uso como combustible automotor, aunque éste no se evalúa en el presente estudio.

Figura 4.6. Diagrama de flujos del Sistema 3.



4.4.5 Variación de la composición

Como ya fue mencionado anteriormente, la cantidad y composición de la corriente de residuos que ingresa a los sistemas de gestión a evaluar anteriormente descritos corresponde a la detallada en la Tabla 3.1.

Con el objetivo de evaluar como se comporta el desempeño de los sistemas ante un cambio de la composición, se evalúan los Escenarios Principales de cada sistema utilizando la composición detallada en la siguiente tabla. La misma surge a partir de un estudio de caracterización de RSU con fines energéticos realizado por la consultora LKSur para la DNE/MIEM y ALUR⁹.

Tabla 4.4. Cantidad y composición de los residuos a considerar en los escenarios con cambios de composición.

Fracción	Composición (% en peso)	Cantidades generadas (ton/año)
Papel y cartón	19,0	133.000
Vidrio	6,0	42.000
Metales ferrosos	2,0	14.000
Metales no ferrosos	1,0	7.000
Plásticos rígidos	5,0	35.000
Plásticos laminados	10,0	70.000
Materiales orgánicos	41,0	287.000
Textiles	2,5	17.500
Residuos verdes	2,5	17.500
Otros	11,0	77.000
Total	100,0	700.000

Se puede observar que el cambio en la composición, respecto a la indicada en la Tabla 4.1, corresponde principalmente a un aumento en la cantidad

⁹ Si bien el informe de dicho trabajo no se encuentra disponible para público en general, fue posible asistir a la presentación del trabajo realizado el día 17 de Mayo de 2013 en las instalaciones de la DNE.

generada de residuos de papel y cartón, vidrio y plásticos, disminuyendo a su vez la cantidad generada de metales y materiales orgánicos.

4.5 Calidad de los datos utilizados

Los datos utilizados en la determinación del ICV deben describir de la mejor forma posible los procesos modelados, y sus desempeños operativos y ambientales. De otra manera, los resultados obtenidos pueden no corresponder a la situación real planteada y, en consecuencia, dar origen a conclusiones equivocadas.

Dado que, con excepción de algunos casos particulares los cuales son indicados, no se cuenta con información precisa a nivel local sobre el desempeño de los procesos modelados, los datos utilizados fueron obtenidos de diferentes referencias bibliográficas (ver 5. Descripción de los procesos unitarios).

Los criterios de selección de los datos se basan principalmente en la necesidad de reflejar las tecnologías comúnmente utilizadas para llevar a cabo las operaciones planteadas.

Existen numerosas publicaciones a nivel internacional, entre las que se destacan los trabajos realizados por el Research Triangle Institute (RTI) y por McDougall-White, dedicadas a procesar y compilar esta información, lo que permite corroborar los datos entre las mismas en el proceso de validación y seleccionar los datos que mejor se adaptan al caso en estudio.

Dos factores que deben ser tenidos en cuenta al adoptar este tipo de información, corresponde al tiempo que poseen los datos, ya que las tecnologías actualmente utilizadas pueden haber sido modificadas, y a la zona a la que estas corresponden, debido a que los datos de desempeño pueden verse afectados por aspectos locales.

4.6 Indicadores y categorías de impacto

La aplicación del modelo de ICV implica la cuantificación de todas las entradas y salidas de insumos y energía, así como todas las emisiones al aire, suelo y agua, resultantes de cada uno de los procesos unitarios y de la totalidad del ciclo de vida de los sistemas evaluados. A partir de este inventario, se aplican por un lado las categorías de impacto necesarias para la evaluación y comparación de los impactos ambientales originados por los sistemas planteados, y por otro, una serie de indicadores utilizados para cuantificar algunos aspectos de especial interés. Debe tenerse presente al

momento de extraer las conclusiones finales del análisis, que los indicadores utilizados en la interpretación de los resultados del ICV no son independientes de las categoría de impacto, sino que en algunos casos representan formas distintas de evaluar el desempeño de un sistema.

Por otro lado, cabe mencionar que los modelos de impactos aplicados no reflejan estrictamente los efectos que puedan darse en la región donde se desarrolla el presente trabajo, ya que éstos dependen de muchos factores locales, como son las características de la atmósfera, suelos y cuerpos de agua.

A su vez, los impactos evaluados se pueden diferenciar de acuerdo al área afectada según estos sean locales, regionales o globales. Cruzando esta información con los puntos donde son llevados a cabo los distintos procesos unitarios (ver 5. Descripción de los procesos unitarios), es posible determinar efectivamente la zona de afectación de los impactos generados.

La clasificación de los indicadores de acuerdo al área de afectación es de gran importancia, especialmente cuando se consideran los eventuales ahorros producidos por el sistema de gestión bajo análisis, respecto al uso de materiales o recursos energéticos.

En la siguiente tabla se resumen las principales características de las categorías de impacto utilizadas en la aplicación del modelo de ACV, las cuales se describen en las siguientes subsecciones.

Tabla 4.5. Categorías de impacto utilizadas.

Fuente: elaboración propia.

Categoría de impacto	Área afectada	Indicador de categoría	Unidades	Modelo de caracterización
Calentamiento global	Global	$\sum PCG_i \cdot m_i$ PCG: Poder de Calentamiento Global m _i : masa emitida de contaminante	tonCO ₂ eq/año	IPCC
Acidificación	Regional	$\sum AP_i \cdot m_i$ AP: Poder de Acidificación m: masa emitida de contaminante	tonSO ₂ eq/año	Capacidad de liberación de H ⁺
Eutrofización	Regional	$\sum EP_i \cdot m_i$ EP: Poder de Eutrofización m: masa emitida de contaminante	tonPO ₄ eq/año	Modelo estequiométrico

Por otro lado, son utilizados otros indicadores, que si bien no entran en la definición de categorías de impacto, son de interés para la interpretación del ICV y cuantificar algunos aspectos que se consideran importantes para conocer el desempeño de los sistemas evaluados. Éstos tratan principalmente respecto al consumo de energéticos y a la emisión de algunos contaminantes específicos.

Tabla 4.6. Otros indicadores utilizados

Fuente: elaboración propia.

Indicador	Descripción	Unidades
Volumen ocupado en SDF	$\frac{\text{Masa de residuos enviados a SDF}}{\text{Densidad de residuos en SDF}}$	m ³ /año
Tasa global de recuperación de materiales	$\frac{\text{Masa de residuos recuperados}}{\text{Masa de residuos que ingresan al sistema}} \cdot 100$	%
Consumo de combustibles	<i>Combustible consumido – Combustible generado</i>	tep/año
Consumo de combustible en transporte	<i>Combustible consumido en transporte</i>	tep/año
Consumo de energía eléctrica	$\text{Energía eléctrica consumida} - \text{Energía eléctrica generada}$	MWh/año
Balance neto de energía	$\text{Consumo de combustibles} + \text{Consumo de energía eléctrica}$	GJ/año
Emisión de dioxinas y furanos	<i>Dioxinas y furanos emitidos</i>	kgPCDD-PCDF/año

1 MWh/año <> 0,086 tep/año; 1 GJ/año <> 0,0239 tep/año.

Por otro lado, dada la visión global que proporciona el ACV, bien no se lleva a cabo en el presente estudio, éste puede representar un punto de partida para incluir otros impactos, como son el tránsito, ruido, olores, paisaje, así como aspectos sociales.

4.6.1 Calentamiento global

A partir del inventario de emisiones al aire de todos los procesos unitarios del ciclo de vida de los sistemas considerados, se cuantifica la emisión total de Gases de Efecto Invernadero (GEI), considerando su contribución al calentamiento global.

Los GEI considerados incluyen el dióxido de carbono (CO_2) provenientes de fuentes fósiles, el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Si bien estos no son los únicos GEI existentes, sí representan los más importantes y para los cuales existen datos respecto a sus factores de emisión para la mayoría de los procesos involucrados.

El modelo de caracterización se basa en los estudios desarrollados por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), a través del cual se le adjudica un valor de Poder de Calentamiento Global (PCG) a cada uno de los GEI, que pondera su efecto de calentamiento y permite expresar la emisión total de GEI en unidades de CO_2 equivalentes. Los valores adoptados se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Poder de Calentamiento Global para un horizonte de 100 años para cada uno de los Gases de Efecto Invernadero.

Fuente: Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC)
(<https://www.ipcc.ch/index.htm>)

Contaminante	PCG
	(kgCO ₂ eq/kg)
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310

Cabe aclarar que no son contempladas en esta categoría las emisiones de CO₂ provenientes de fuentes biogénicas (restos de alimentos, residuos verdes, papel, etc.), ya que se asume que estas emisiones integran el ciclo corto del carbono y no contribuyen al aumento de la concentración de estos gases en la atmósfera.

Dado que el tiempo de vida promedio de estos compuestos excede largamente el tiempo de mezcla troposférico, el punto donde ocurran estas emisiones es indiferente. Por lo tanto, es posible decir que este es un impacto netamente global.

Por otro lado, los resultados obtenidos por aplicación de esta categoría de impacto son comparados con los valores presentados en el Inventario Nacional de GEI elaborado en nuestro país, en el cual existe una sección dedicada específicamente a las emisiones provenientes del sector desperdicios (Unidad de Cambio Climático - DINAMA - MVOTMA, 2010).

4.6.2 Acidificación

A través de esta categoría de impacto se cuantifican las emisiones de aquellos contaminantes cuya liberación al ambiente pueda generar compuestos ácidos por combinación con el agua atmosférica o el suelo, ya sea de forma directa o actuando como precursores, que mediante precipitaciones pueda ocasionar la afectación de ecosistemas, suelos, cuerpos de agua y organismos vivos. Dado que los gases ácidos pueden recorrer grandes distancias antes de precipitar, se considera que el impacto producido se da a nivel un nivel regional.

Los principales contaminantes causantes de acidificación son las emisiones al aire de dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), amoníaco (NH_3) y cloruro de hidrógeno (HCl). El modelo de caracterización utilizado corresponde a la asignación de un Poder de Acidificación (AP) a cada contaminante en función de la capacidad de producir H^+ , expresada en emisiones equivalentes de dióxido de azufre (Heijungs *et al*, 1992). En la Tabla 3.8 se muestran las reacciones asociadas a cada compuesto y los poderes de acidificación correspondientes.

Tabla 4.8. Poder de Acidificación (AP) genérico para los contaminantes emitidos.

Fuente: (Heijungs *et al*, 1992)

Contaminante	Mecanismo	AP (kgSO ₂ eq/kg)
SO ₂	$SO_2 + H_2O + O_3 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{-2} + O_2$	1
NO _x	$NO_2 + 1/2 H_2O + 1/4 O_2 \rightarrow H^+ + NO_3^-$	0,70
NH ₃	$NH_3 + 2O_2 \rightarrow H^+ + NO_3^- + H_2O$	1,88
HCl	$HCl \rightarrow H^+ + Cl^-$	0,88

Cabe mencionar que existen modelos más recientes, como el modelo RAINS (Regional Air Pollution Information and Simulation) desarrollado por el IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis)¹⁰, que permiten determinar la acidificación potencial incluyendo factores adicionales que toman en cuenta las características de las zonas afectadas, como son aspectos climáticos y vulnerabilidad de los ecosistemas presentes (Guinée, 2004). Sin embargo, sólo existen estimaciones de estos factores principalmente para países europeos, no contando con datos para nuestro país. Por lo tanto, sólo son tenidos en cuenta los potenciales de acidificación genéricos que sólo valoran las propiedades inherentes a cada compuesto.

4.6.3 Eutrofización

Esta categoría de impacto cuantifica la liberación de nutrientes al medio ambiente que puede provocar una producción excesiva de biomasa en

¹⁰<http://www.iiasa.ac.at/>

ecosistemas acuáticos, causando pérdida de la biodiversidad por disminución del oxígeno disuelto y envejecimiento prematuro del cuerpo de agua. Al igual que el potencial de acidificación, éste es un impacto que se da a nivel regional.

Los contaminantes que contribuyen a la eutrofización son las emisiones al aire de óxidos de nitrógenos (NO_x) y amoníaco (NH_3), y las emisiones al agua de nitrógeno (N) y fósforo (P). Si bien las emisiones gaseosas de NO_x y NH_3 ya son contabilizadas en la categoría de potencial de acidificación, esto no impide que también sean tenidas en cuenta en el potencial de eutrofización, ya que se puede asumir que ambos impactos son complementarios y no excluyentes. Además, otra forma en que se produce déficit de oxígeno es causado por la emisión al agua de materiales orgánicos, generalmente expresada como Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Heijungs *et al*, 1992).

El modelo de caracterización utilizado consiste en un balance estequiométrico entre estos contaminantes a través del cual se identifica la equivalencia en el crecimiento de biomasa en los sistemas acuáticos, asumiendo una composición representativa de ésta ($\text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P}$). A los contaminantes considerados se les asigna un Poder de Eutrofización (EP) el

cual pondera el potencial expresado en unidades comunes en equivalentes de fosfatos (PO_4^{-3}), los cuales se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 4.9. Poder de Eutrofización (EP) genérico para los contaminantes emitidos.

Fuente: (Heijungs *et al*, 1992)

Contaminante		EP ($\text{kgPO}_4^{-3}\text{eq/kg}$)
Emisiones al aire	NH_3	0,35
	NO_x	0,13
Emisiones al agua	N	0,42
	P	3,06
	DQO	0,022

Cabe mencionar que dicho modelo considera que todos estos contaminantes poseen sus correspondientes potenciales de contribuir al crecimiento de biomasa, no considerando posibles limitaciones de algunos de ellos. En este sentido, existen algunos modelos que permiten incluir factores locales de las zonas afectadas para tener en cuenta estos aspectos (Guinée, 2004). Dado que no existen datos para nuestro país, que al igual que para la acidificación, sólo son adoptados los potenciales de eutrofización genéricos inherentes a cada contaminante.

4.6.4 Volumen ocupado en SDF

Este indicador consiste en considerar la cantidad de residuos que son enviados a disposición final y, de acuerdo a la densidad que éstos adquieren, se determina el volumen anual ocupado en el SDF. Se deben incluir tanto la fracción mixta de residuos sin procesar, como las cenizas de la incineración y el compost utilizado como material de cobertura, dependiendo del escenario planteado. Más adelante se detallan las densidades específicas para cada material que componen las distintas corrientes de residuos (ver 5.9 Disposición final).

Claramente se trata de un indicador vinculado con impactos que se dan exclusivamente a nivel local, siendo de gran importancia si se tiene en cuenta la baja capacidad de los SDF actuales de prolongar su vida útil.

4.6.5 Tasa global de recuperación de materiales

La Tasa Global de Recuperación de Materiales (TGRM) representa un indicador de cuantificación de la cantidad de residuos recuperados y destinados a la producción de nuevos materiales reutilizables, en relación a la cantidad total de RSU generados.

De esta manera es posible analizar fácilmente la capacidad de un sistema de gestión en el aprovechamiento de los recursos materiales.

4.6.6 Consumo de combustibles y energía eléctrica

Como ya fue mencionado, los aspectos energéticos poseen especial interés en el presente trabajo, debido a todos los esfuerzos que son realizados a nivel del Estado para diversificar la matriz de energía, así como en la promoción de la eficiencia y optimización de los recursos energéticos.

La determinación de estos indicadores implica la contabilización de las entradas y salidas de combustibles y energía eléctrica de cada uno de los procesos unitarios involucrados. Cabe mencionar que el signo de estos indicadores puede ser negativo si se considera la posibilidad de generación y ahorro.

Un caso estudiado en forma particular se refiere al consumo de combustibles en la recolección y transporte de residuos, ya que se pretende evaluar la incidencia de este proceso unitario en el conjunto.

Por último, también se determina el balance neto de energía, de forma de evaluar el desempeño global respecto al uso de energía de los sistemas

propuestos. Éste se determina mediante la adición de los consumos de combustibles y electricidad, expresados en unidades comunes de energía.

4.6.7 Emisión de dioxinas y furanos

El criterio por el cual fueron seleccionados estos indicadores se basa en los efectos potenciales sobre la salud y el medio ambiente, dada la toxicidad y persistencia de estas sustancias. Además, existe en Uruguay un inventario nacional de emisiones de dioxinas y furanos, el cual puede ser considerado como línea de base y punto de referencia a partir del cual se comparan los resultados obtenidos.

El término dioxinas y furanos se refiere a una familia de más de 200 congéneres de compuestos policlorados. Ambos grupos de compuestos son muy estables y persistentes, lo que genera las condiciones ideales para su bioacumulación en los organismos. Entre los principales efectos toxicológicos en humanos se puede mencionar el aumento en incidencias de cáncer. Durante los años 2002 y 2003 fue realizado en nuestro país un nuevo Inventario Nacional de Liberaciones de Dioxinas y Furanos (DINAMA, 2002/2003).

Respecto al área de afectación, dada la persistencia de estos contaminantes, puede asumirse que los impactos causados por la liberación al ambiente de estos contaminantes se dan a nivel regional.

La determinación de esta categoría de impacto se realiza simplemente por cuantificación de las emisiones de todas las operaciones unitarias abarcadas por el sistema de gestión estudiado.

5. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS UNITARIOS

5.1 Introducción

En la sección a continuación se recopilan los datos de desempeño de los procesos unitarios que integran los sistemas de gestión a evaluar que son adoptados en la aplicación del modelo desarrollado para la obtención del ICV.

En el ANEXO II se presenta la información complementaria respecto a la descripción de cada proceso y a las especificaciones de las tecnologías asumidas.

La selección de las alternativas planteadas se basa en los antecedentes existentes a nivel local en relación a aquellas tecnologías que han sido estudiadas por organismos gubernamentales, así como por referencias internacionales respecto a las mejores alternativas posibles para los procesos planteados.

A su vez, los datos utilizados para describir el desempeño de las distintas operaciones, fueron seleccionados tras recopilar, contrastar y validar para cada caso la información proveniente de distintas fuentes.

5.2 Separación en origen

Si bien la separación en origen se encuentra fuera de los límites de los sistemas de gestión a analizar, esta clasificación inicial determina los flujos de residuos desviados hacia cada una de las alternativas de tratamiento y disposición, así como la viabilidad técnica y económica del sistema de gestión propuesto.

En el presente estudio se adoptan diferentes tasas de separación en origen de acuerdo al escenario bajo análisis, las cuales fueron definidas anteriormente (ver 4.4 Definición de los sistemas a estudiar).

En el presente trabajo se asume que la separación en origen se da de forma voluntaria por la población. De esta manera, dependiendo del sistema evaluado y la fracción que se considera, se asume que la población traslada los residuos generados hasta los sistemas específicos de recolección en la acera.

5.3 Combustibles y energía eléctrica

Previo a la descripción de los distintos procesos unitarios que constituyen los sistemas de gestión a evaluar, resulta necesario detallar los aspectos

asociados al consumo de combustibles y energía eléctrica, que son comunes a todas las operaciones consideradas.

El ICV debe incluir los flujos de materia y energía asociados a la producción y uso de combustibles y energía eléctrica que son consumidos en los sistemas evaluados, ya sea de forma directa como indirecta a través de los sistemas secundarios.

Cabe aclarar que los valores respecto a las cargas ambientales asociadas al consumo de energía eléctrica del sistema, pueden ser adoptados en la sustitución de energía resultante de la generación y exportación del sistema, ya que esta energía desplaza a la producción de forma tradicional.

El consumo de combustibles no sólo presenta las cargas ambientales derivadas de su utilización, producto de la combustión, sino también aquellas asociadas a la extracción y producción de los mismos (previas a la combustión).

Las emisiones originadas en el consumo dependen de los vehículos, máquinas o procesos involucrados. En la siguiente tabla se detallan los factores de emisión por el uso de gas natural, gas-oil y fuel oil, que también incluyen las emisiones previas a la combustión.

Tabla 5.1. Factores de emisión asociados a la producción y consumo de combustibles.

Fuente: (Dumas, 1999)

		Gas natural (g/m ³)	Gas-oil (g/L)	Fuel oil (g/L)
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	2189,5	3489,8	3385,5
	CH ₄	6,09	0,52	0,56
	N ₂ O	1,92E-04	1,35E-02	1,35E-02
	SO _x	31,57	24,77	23,25
	NO _x	8,17	7,24	5,30
	HCl	1,57E-03	3,00E-03	8,47E-02
	NH ₃	4,82E-02	4,79E-03	2,13E-01
	Dioxinas y furanos	1,76E-12	3,00E-12	3,15E-10
Emisiones al agua	DQO	0,69	0,10	0,11
	N total	7,34E-04	1,30E-03	1,40E-03
	P total	5,75E-05	6,00E-03	1,49E-04
	Dioxinas y furanos	SD	SD	SD

Respecto a la energía contenida en los combustibles fósiles de interés, en la siguiente tabla se detalla el Poder Calorífico Inferior (PCI) de cada uno de estos.

Tabla 5.2. Poder Calorífico Inferior (PCI) de los combustibles.

Fuente: (Dumas, 1999)

Combustible	Energía térmica
Gas oil	0,0387 GJ/L
Fuel oil	0,0417 GJ/L
Gas natural	0,0381 GJ/m ³

Para el caso de la energía eléctrica, las cargas ambientales originadas dependen del método de generación utilizado y su eficiencia. A continuación

se muestra la evolución de la matriz de generación eléctrica en nuestro país para los últimos años, así como la proyección estimada para el año 2015, de acuerdo a información de la DNE.

Tabla 5.3. Matriz de generación y consumo de energía eléctrica en el Uruguay para el período 2000 – 2012 (MWh/mes).

Fuente: elaboración propia a partir del procesamiento de datos de la DNE (www.dne.gub.uy/publicaciones-y-estadisticas/energia-electrica/)

Año	Generación						Total importación	Total consumo
	Biomasa	Gas oil/Fuel oil	Hidráulica	Eólica	Gas Natural	Total generación		
2000	0	41.255	587.556	0		628.810	110.673	739.483
2001	0	1.252	766.171	0		767.423	10.224	777.647
2002	0	2.166	794.614	0		796.780	46.593	843.373
2003	0	550	710.796	0		711.346	36.186	747.532
2004	0	89.733	396.860	0		486.593	195.660	682.253
2005	0	79.766	556.926	0		636.692	132.101	768.793
2006	0	164.192	299.496	0		463.689	236.033	699.721
2007	3.865	101.191	672.395	0		775.519	65.716	841.235
2008	11.409	281.741	375.003	0		668.152	80.120	748.272
2009	15.796	218.171	431.226	3.469		668.662	122.337	790.999
2010	23.707	95.107	722.193	5.667		846.673	32.234	878.907
2011	30.636	213.871	539.908	9.277		793.693	39.197	832.890
2012	42.121	307.419	451.737	9.239		810.517	61.808	872.326
Promedio 2000/2012	9.810	122.801	561.914	2.127		696.504	89.914	786.418
(%)	1,4	17,6	80,7	0,3		100,0	11,4	
Promedio 2009/2012	28.065	208.642	536.266	6.913		779.886	63.894	843.781
(%)	3,6	26,8	68,8	0,9		100,0	7,6	
Proyección 2015 (%)	18	1	51	24	6	100		

Como se puede observar, la capacidad de generación ha aumentado considerablemente en los últimos años resultado de las ampliaciones realizadas en las centrales térmicas y la incorporación de nuevas fuentes renovables. En este sentido, se espera que el desarrollo de fuentes alternativas continúe desarrollándose en el futuro de acuerdo a las estimaciones de las autoridades nacionales.

Más allá de estas nuevas fuentes de energía, se espera la generación hidráulica continúe siendo la fuente predominante, aunque esta es muy variable ya que depende del régimen de precipitaciones, además de encontrarse limitada en su capacidad de generación.

De esta manera, dado que el presente trabajo posee un enfoque prospectivo, al seleccionar el perfil de generación eléctrica para ser ingresado al modelo de ACV, se opta por considerar los valores correspondientes a la proyección para el año 2015. Si bien en la actualidad estos perfiles de generación eléctrica aún no han sido alcanzados, la renovación de la matriz energética avanza rápidamente hacia dicho escenario, especialmente en lo que se refiere a las fuentes de energía eólica.

Cabe mencionar que la adopción de los valores de la matriz eléctrica proyectada a futuro, provoca que las cargas ambientales asociadas resultantes de la aplicación del modelo de ACV, difieran de la situación real actual. Esto se refleja principalmente en las emisiones de gases a la atmósfera, que son muy importantes para el caso de las fuentes de generación de origen fósil, las cuales poseen actualmente un peso considerable en la matriz.

Para asignar los valores de las emisiones derivadas del uso de energía eléctrica, es necesario tener en cuenta los aspectos asociados a la obtención de combustibles, las eficiencias de generación eléctrica, y las pérdidas de transmisión y distribución eléctrica.

En la Tabla 5.4 se muestran los valores adoptados de acuerdo a referencias internacionales en relación a las emisiones asociadas a la generación de energía eléctrica. De acuerdo a lo que se especifica en las referencias, se considera una eficiencia de generación de 32,6 % para fuel-oil, 26,0 % para gas-oil, y 32,5 % para biomasa. Además, se estima una pérdida del 4 % en la transmisión y distribución en la red (Dumas, 1999). Es necesario mencionar que se asume que tanto la generación hidráulica como la eólica no producen ningún tipo de emisión.

Tabla 5.4. Factores de emisión para la producción de energía eléctrica según el combustible utilizado en la generación (g/kWh).

Fuente: (Dumas, 1999)

		Fuel-oil	Gas natural	Biomasa	Total
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	898,5	665,3	0,0	48,9
	CH ₄	0,15	1,85	0,00	0,11
	N ₂ O	SD	SD	0,0	
	SO _x	6,18	9,58	0,03	0,64
	NO _x	1,41	2,48	0,65	0,28
	HCl	2,25E-02	4,79E-01	0,00E+00	2,90E-02
	NH ₃	5,64E-02	1,47E-02	SD	1,44E-03
	Dioxinas y furanos	SD	SD	0,00E+00	
Emisiones al agua	DQO	0,03	0,21	0,00	0,01
	N total	3,72E-04	2,23E-04	0,00E+00	1,71E-05
	P total	3,95E-05	1,74E-05	0,00E+00	1,44E-06
	Dioxinas y furanos	SD	SD	0,00E+00	

5.4 Recolección y transporte

El primer proceso incluido dentro de los límites del sistema corresponde a la recolección de las distintas fracciones de residuos generados y su transporte hacia las correspondientes operaciones unitarias para su tratamiento y disposición.

El transporte de cada una de las fracciones recolectadas es realizado en los vehículos más apropiados, donde la capacidad de carga de éstos define el número de viajes a realizar.

De acuerdo a los sistemas de gestión de residuos propuestos, se considera la posibilidad de que los residuos sean separados en tres fracciones: mixta, seca y húmeda; para cada una de las cuales debe existir un sistema de recolección específico teniendo en cuenta sus características.

Cabe aclarar que, a efectos de la determinación del ICV, se considera que cada una de las fracciones es recolectada mediante el mismo sistema en todos los circuitos, lo cual no es necesariamente cierto si se consideran otras fuentes de residuos, como el barrido y limpieza, circuitos suburbanos y rurales, y otras situaciones que requieren un método particular de recolección.

Para la fracción mixta se adopta el régimen actual de recolección mediante contenedores distribuidos en toda el área de cobertura. En Montevideo existen aproximadamente 8.700 contenedores metálicos de carga lateral con capacidades de 2,4 y 3,2 m³ colocados en las aceras y distribuidos en las distintas zonas de la ciudad. Los residuos depositados son recolectados por camiones compactadores de carga lateral con una capacidad de 10 ton y transportados hacia las correspondientes instalaciones (incineración o SDF).

Por su parte, la recolección de la fracción seca se realiza a través de puestos de entrega voluntaria ubicados en distintos centros de recepción, como pueden ser comercios de grandes superficies y otros sitios de alta circulación de la población; a través de contenedores exclusivos para cada material que se encuentran en la acera; o mediante otros tipos de servicios que puedan existir dependiendo del área en cuestión.

La distribución de los puntos de recepción afecta la tasa de participación de la población y, por ende, la recuperación de materiales. Pueden ser utilizados una combinación de sistemas dependiendo de las características de la zona y la población. Los distintos tipos de centros de recepción de materiales incluyen contenedores para un solo tipo de material (por grupos), incluso para distintas calidades de un mismo material que proporcionan materiales de mayor valor; o para mezcla de diferentes materiales, que pueden ser de utilidad en algunos casos, aunque los materiales recolectados deben ser posteriormente clasificados.

Los vehículos utilizados en la recolección de la fracción seca pueden ser camiones abiertos de 20 m³ de capacidad, de carga manual o equipados con guinches para el levantamiento de depósitos de algunos residuos especiales

(por ejemplo vidrio). Una vez recolectada la fracción seca, esta es transportada a la planta de clasificación y acondicionamiento más cercana.

Al igual que para la fracción mixta, el sistema de recolección propuesto para la fracción húmeda se basa en contenedores colocados en la acera, utilizando también camiones compactadores para su recolección y transporte hacia la planta de acondicionamiento y tratamiento biológico. Sin embargo, para la fracción húmeda los contenedores deben ser de menor tamaño y mantener una frecuencia de recolección mayor por consideraciones sanitarias, dadas las velocidades mayores de descomposición que pueden provocar generación de olores molestos, lixiviados, etc.

Las emisiones relacionadas con la recolección de residuos se deben básicamente a las emisiones producidas por el consumo de gas-oil necesario para el transporte, cuyos factores de emisión se muestran en Tabla 5.1. La determinación del consumo de combustibles requiere de la estimación de las distancias recorridas, el consumo específico de los vehículos utilizados, la velocidad en que se realiza la recolección y el transporte, y el régimen de paradas entre los puntos de recolección.

Dado que no fue posible contar con datos locales, el consumo específico de gas-oil para los camiones utilizados fue adoptado según la bibliografía consultada (McDougall - White, 2004), diferenciando entre camiones compactadores (0,15 L/km·ton) y camiones de caja abierta, los cuales se distinguen según éstos realicen predominantemente un recorrido dentro de la ciudad (40 L/100km), o de media y larga distancia (30 L/100km).

En la Tabla 5.5 se resumen los principales aspectos asociados al transporte, necesarios para la determinación del consumo de combustible correspondiente a cada una de las fracciones. En ésta, no sólo se enumera el transporte de las tres fracciones de residuos generados que ingresan al sistema (mixta, seca y húmeda), sino también el transporte de aquellas corrientes intermedias de materiales transportados entre los procesos unitarios (materiales reciclables, descartes y compost). Se omiten el transporte de cenizas de la incineración hacia el SDF, ya que se entiende que si la planta de incineración se encuentra en el mismo predio que el SDF, el consumo de combustible es muy menor.

Como puede observarse en los datos indicados, además de las distancias recorridas, el consumo de combustible para la recolección en camiones compactadores también depende de forma importante de la cantidad de

residuos recolectada, ya que ésta define los recorridos internos realizados dentro de la ciudad y los dispositivos mecánicos de compactación.

Respecto a las distancias recorridas en cada viaje realizado, éstas fueron estimadas como un promedio de las distancias recorridas hasta el destino según la ubicación de los circuitos de recolección, teniendo en cuenta las distancias recorridas dentro de cada circuito y ponderando la distancia resultante de acuerdo a población de cada zona considerada como forma de relacionar la cantidad de residuos recolectada.

Tabla 5.5. Aspectos considerados para la determinación del consumo de combustible asociado al transporte y recolección de residuos.

Fuente: elaboración propia / Consumo específico de combustible: McDougall – White, 2004.

Fracción	Origen	Destino	Tipo de vehículo	Capacidad de carga	Distancia media recorrida	Consumo específico de combustible
Mixta	Separación en origen	Incineración	Camión compactador	10 ton	25 km	0,15 L/ton-km
Seca	Separación en origen	Planta de clasificación	Camión abierto	20 m ³	10 km	40 L/100km
Húmeda	Separación en origen	Tratamiento biológico	Camión compactador	10 ton	25 km	0,15 L/ton-km
Materiales descartados	Planta de clasificación	Incineración	Camión abierto	20 m ³	15 km	30 L/100km
Materiales reciclables	Planta de clasificación	Planta de reciclaje	Camión abierto	20 m ³	50 km	30 L/100km
Compost	Tratamiento biológico	Punto de aplicación	Camión abierto	20 m ³	50 m	30 L/100km

5.5 Incineración

El proceso de incineración de residuos considerado parte de la base de la propuesta elaborada por Themelis Associates para la instalación en nuestro país de un sistema de generación de energía a partir de residuos (Themelis – Diaz, 2012).

En cuanto a la localización de la planta de incineración, se adopta que la misma se localiza en las inmediaciones del actual SDF de Felipe Cardozo, contando con las mismas vías de acceso y otras infraestructuras necesarias. A su vez, la distancia que debe recorrerse para la disposición de las cenizas resultantes del proceso de incineración puede asumirse como despreciable.

La tecnología propuesta de incineración de RSU es la de combustión en parrilla móvil, con generación de vapor de alta presión para la generación de energía eléctrica a través de una turbina acoplada a un generador.

Por otro lado, también se requiere el uso un combustible auxiliar para calentar el horno durante el arranque del incinerador o para mantener la temperatura del hogar cuando el PCI de los residuos es muy bajo. Para los escenarios planteados en que se encuentre disponible, se utiliza parte del biogás producido en el tratamiento biológico por digestión anaerobia de la

fracción húmeda (ver 4.8 Tratamiento biológico), y en los escenarios en que no se realice tratamiento biológico o el biogás producido no sea suficiente, será complementado con gas natural de la red de distribución.

Si bien depende de la frecuencia en que se realiza el arranque del incinerador y de las características de los residuos incinerados (humedad y PCI), se asume una cantidad mínima de gas natural (100 % metano) necesaria de 0,23 m³/ton de residuos incinerados (McDougall - White, 2004). En caso de que sea utilizado gas natural como combustible auxiliar, es necesario incluir estas emisiones en el ICV de acuerdo a la Tabla 5.1; mientras que se consideran nulas las emisiones producidas por la utilización de biogás como combustible auxiliar.

En cuanto a las salidas del proceso, se supondrá que toda la energía liberada será utilizada para la generación de energía eléctrica, para lo cual se asumirá una eficiencia de conversión de 28 % (Themelis – Diaz, 2012). Por otro lado, las plantas de incineración también consumen cierta cantidad de energía, la cual se estima en aproximadamente 15 % (Themelis – Diaz, 2012) del total de energía generada, mientras que el resto de la energía se exporta a la red de distribución de UTE.

Esta energía eléctrica exportada se acredita como ganancia en el modelo y se asume que desplaza a la energía producida en el país de forma convencional, según la matriz eléctrica detallada en la Tabla 5.3. De esta manera, es necesario descontar las emisiones producidas por la generación de la energía desplazada a las emisiones resultantes del proceso de incineración.

La generación de energía en el proceso de incineración depende de la composición de los residuos, ya que esta condiciona la energía contenida en los mismos, la cual se determina a través del PCI. En la siguiente tabla se detalla el PCI de las fracciones presentes en los RSU.

Tabla 5.6. Poder calorífico inferior de las distintas fracciones de los RSU.

Fuente: (Themelis – Diaz, 2012)

Fracción	PCI (MJ/ton)
Papel y cartón	16.300
Vidrio	200
Metales ferrosos	700
Metales no ferrosos	700
Plásticos rígidos	32.600
Plásticos laminados	32.600
Materiales orgánicos	4.700
Textiles	17.500
Residuos verdes	18.700

De acuerdo a estos valores, dado que el proceso de incineración recibe solo los residuos de la fracción mixta que no fueron separados y los descartes de las plantas de clasificación, en los sistemas que se plantea la separación y reciclaje de la fracción seca, el PCI de los residuos se ve afectado negativamente por la separación del plástico, y del papel y cartón, ya que estos son los materiales con mayor contribución al PCI; mientras que este aumentaría mediante la separación de metales y de vidrio por su bajo PCI, así como por el retiro de los materiales orgánicos dada el elevado contenido de humedad de éstos.

La determinación de las emisiones atmosféricas producidas en el proceso de incineración se realiza a partir de los factores de emisión de acuerdo a referencias consultadas (Thorneloe, 2000a; Thorneloe, 2000b). Dado que las emisiones producidas dependen del material que se incinera, los factores de emisión se dan en base a cada uno de los materiales de forma individual, aunque de esta manera se omite la posible formación de compuestos resultantes de la interacción entre los distintos materiales (McDougall - White, 2004).

Este proceso no presenta emisiones al agua, aunque sí se agrega la generación de residuos sólidos, correspondientes a los lodos y cenizas

resultantes del proceso, los cuales requieren de disposición final. En la Tabla 5.7 se detallan los factores de emisión utilizados.

Cabe mencionar que las emisiones resultantes del proceso de incineración deben cumplir con los estándares establecidos de emisiones a la atmósfera para fuentes fijas. En nuestro país, si bien no existe una normativa en relación a este tema, existe un documento borrador elaborado por el grupo Gesta Aire en febrero de 2012 que introduce límites máximos permisibles para fuentes fijas de acuerdo al proceso y tipo de fuente, existiendo específicamente valores límites para varios parámetros para incineradores de residuos sólidos municipales. Más allá de que estos estándares no se encuentran aún vigentes, los mismos ya son aplicados como referencia para nuevas instalaciones.

Por último, es necesario incluir las emisiones y consumos de energía asociados al uso de los insumos auxiliares. Este es el caso del uso de cal en el sistema de tratamiento de los gases ácidos de combustión, cuyos factores de emisión y de energía en su fabricación se muestran en la Tabla 4.8, así como el factor de utilización en base a la cantidad de residuos incinerados.

Tabla 5.7. Factores de emisión según el material para el proceso de incineración (g/ton).

Fuente: (Thorneloe, 2000a)

		Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles	Orgánicos	Otros
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	0	15.422	43.546	43.999	2.643.581	2.745.187	1.280.000	0	1.280.000
	CH ₄	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	SD	1,36	SD
	N ₂ O	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
	SO _x	381,02	6,08	14,15	14,29	1.156,36	1.112,77	118,00	162,48	118,00
	NO _x	892,98	14,28	33,12	33,46	2.710,21	2.608,04	946,00	380,77	946,00
	HCl	181,08	2,89	6,72	6,79	549,57	528,85	75,00	77,21	75,00
	NH ₃	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
	Dioxinas y furanos	2,25E-05	1,02E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,69E-04	3,50E-04	2,33E-05	1,08E-05	2,33E-05
Residuos sólidos		84.000	900.000	850.000	900.000	90.000	60.000	77.000	75.000	420.000

Tabla 5.8. Factores de emisión para la fabricación de cal (g/ton).

Fuente: (Thorneloe *et al*, 2007)

Parámetro		Factor
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	3.322
	CH ₄	856,09
	N ₂ O	SD
	SO _x	0,00
	NO _x	0,00
	HCl	1.169,14
	NH ₃	0,18
	Dioxinas y furanos	SD
Emisiones al agua	DQO	14,37
	N total	4,13E-02
	P total	5,72E-01
	Dioxinas y furanos	SD
Energía eléctrica (kWh/ton)		1489,17
Factor de utilización (ton/ton)		0,0071

5.6 Plantas de clasificación y acondicionamiento

Dado que las fracciones de residuos separados en origen pueden contener distintos materiales contaminantes, es necesario realizar una clasificación de los materiales previa para que puedan ser finalmente recuperados. De acuerdo a los sistemas de gestión a evaluar, se plantea la implementación de plantas de clasificación y acondicionamiento de los materiales contenidos en la fracción seca separada en origen y recolectada en los distintos puntos de entrega voluntaria.

Se asume que la operativa de estas plantas de clasificación es de forma manual, similar a las plantas que la IdeM ha instalado en distintas zonas de Montevideo, las cuales cubren todos los circuitos de recolección de forma eficiente en lo que respecta a las distancias recorridas en el transporte de residuos (ver I.5 Sistema actual de gestión de RSU en el AMM).

Por otro lado, existe cierta cantidad de residuos que son descartados por no cumplir con los requisitos de los materiales destinados a reciclaje, ya sea por su grado de contaminación o porque fueron mal clasificados en origen. Los residuos descartados de las plantas de clasificación son recolectados e incorporados al resto de la fracción mixta. Se asume una tasa de descarte del 10 % para cada uno de los materiales, respecto a la cantidad de residuos que ingresa a la planta de clasificación.

Las principales cargas ambientales derivadas de esta operación provienen del consumo de energía eléctrica y combustible. Ya que no se cuenta con datos específicos a nivel local, de acuerdo a las referencias consultadas (McDougall - White, 2004) se adopta de un consumo de 8 kWh de energía eléctrica y de 0,1 L de gas-oil por tonelada de residuos que ingresan a la planta de clasificación.

Cabe mencionar que la planta de tratamiento biológico también requiere una primera etapa de acondicionamiento de los materiales orgánicos previo a su ingreso al reactor de digestión, la cual consiste básicamente en la reducción de tamaño de las partículas y la separación de materiales contaminantes, principalmente plásticos. Al igual que en las plantas de clasificación, este material descartado es desviado junto a la fracción mixta hacia la planta de incineración. Esta planta puede ser considerada como parte de la operación de tratamiento biológico, así como los aspectos ambientales, por lo que no será tratado en esta sección (ver 5.8 Tratamiento biológico)

5.7 Reciclaje

La modelación de los procesos de reciclaje asume que cada material reciclado posee las mismas propiedades y funcionalidad que los materiales fabricados a partir de materia prima virgen y los sustituyen en cantidades iguales. Esto no es necesariamente cierto, ya que los materiales obtenidos a partir del proceso de reciclaje tienen generalmente calidades inferiores, dada la baja homogeneidad y el nivel de impurezas presentes en los residuos, por lo que generalmente son utilizados para la confección de otro tipo de productos. Además, en algunos procesos de fabricación de materiales vírgenes es común, e incluso necesaria, la incorporación de cierta cantidad de materiales recuperados.

Un aspecto de gran importancia es el hecho de que las cargas ambientales determinadas en la producción de cierto material se presentan generalmente en base a la cantidad final de material producido. Sin embargo, el objetivo del análisis de un sistema de gestión de residuos sólidos es el manejo de determinada cantidad de residuos generados. Por lo tanto, el desempeño de los procesos de reciclaje y la sustitución de materiales vírgenes deben estar expresados en función de la cantidad de residuos que ingresan a los procesos de reciclaje, con lo cual es necesario considerar la eficiencia de las operaciones que son llevadas a cabo.

La determinación del ICV asociado al reciclaje de materiales recuperados de los RSU (proceso secundario) debe considerar las cargas ambientales derivadas del propio proceso, del consumo de energía y combustible, así como de la producción y transporte de los insumos auxiliares utilizados. Las cargas ambientales derivadas de la producción de materiales a partir de materia prima virgen (proceso primario), deben ser descontadas del ICV, ya que se asume que estos son sustituidos por los materiales reciclados.

Debido a la falta de información relativa a la operación y desempeño de los procesos a nivel local, se asumirán valores de las cargas ambientales obtenidas de bibliografía consultada.

Como ya fue mencionado, es necesario tener en cuenta la eficiencia de los procesos de reciclaje de manera de expresar sus desempeños en función de los residuos que ingresan a los procesos de reciclaje y no a los productos finales elaborados. En la siguiente tabla se muestran los valores de eficiencia adoptados para los procesos de reciclaje de cada uno de los materiales considerados.

Tabla 5.9. Eficiencia de los procesos de reciclaje según el material.

Fuente: (RTI International, 2003)

	Eficiencia de reciclaje
	(%)
Papel y cartón	94,3
Vidrio	97,1
Metales ferrosos	84,0
Metales no ferrosos	93,5
Plásticos rígidos	86,2
Plásticos laminados	86,2

Cabe aclarar una parte de las pérdidas que ocurren en los procesos de reciclaje de materiales se da en forma de emisiones al ambiente, agua y aire, las cuales se detallan más adelante; mientras que otra parte corresponde a descartes y residuos sólidos. En principio, estos residuos pueden ser considerados como RSI, representando salidas del sistema de producto, ya que estos no son considerados en el presente estudio. Si bien se estiman las cantidades generadas en cada uno de los escenarios de reciclaje, asumiendo que todas las pérdidas corresponden a residuos sólidos, no se le

asignan cargas ambientales asociadas a esta generación, debido a que se desconoce el desempeño de los sistemas de gestión de RSI y por significar una porción muy menor de éstos.

En cuanto al consumo de energéticos en la fabricación de materiales vírgenes y en el reciclaje de materiales recuperados, en la Tabla 5.10 y Tabla 5.11 se detallan los consumos de energía eléctrica, gas oil, gas natural y fuel oil, expresados en función a los productos finales elaborados.

Se asume que la energía eléctrica consumida, tanto en los procesos de reciclaje, como en la fabricación de materiales vírgenes, es generada a partir de la matriz energética de Uruguay indicada en la Tabla 5.3.

Cabe aclarar que el consumo de combustibles no debe incluir el correspondiente al transporte de los materiales recuperados, ya que éstas fueron tenidas en cuenta en secciones anteriores (ver 5.4 Recolección y transporte), aunque sí debe considerar el transporte de otros insumos auxiliares utilizados. Por el contrario, el ICV asociado a la producción de materiales vírgenes debe tener en cuenta el consumo de combustibles en todos los tipos de transporte.

Además, en aquellos procesos donde sean utilizados otros insumos energéticos que no son incluidos en el estudio, éstos son expresados en función de uno de los insumos que sí son considerados. Este es el caso del uso de carbón en la fabricación de acero, el cual fue sustituido en el análisis por fuel oil según el equivalente energético. De esta manera se incurre en una aproximación, ya que se adoptan factores de emisión que pueden diferir considerablemente entre ambos combustibles.

Las emisiones resultantes del consumo de energía eléctrica y combustibles, se determinan según los factores de emisión detallados en la Tabla 5.1 y Tabla 5.4, respectivamente.

Tabla 5.10. Consumos de energía eléctrica y combustibles para la fabricación de materiales vírgenes, según el material.

Fuente: (RTI International, 2003)

	Energía eléctrica (kWh/ton)	Gasoil (L/ton)	Gas natural (m ³ /ton)	Fuel oil (L/ton)
Papel y cartón	3.110	25	359	26
Vidrio	64	17	145	13
Metales ferrosos		57	405	714
Metales no ferrosos	20.592	98	758	477
Plásticos rígidos	433		339	315
Plásticos laminados	479		401	304

Tabla 5.11. Consumos de energía eléctrica y combustibles para los procesos de reciclaje, según el material.

Fuente: (RTI International, 2003)

	Energía eléctrica (kWh/ton)	Gasoil (L/ton)	Gas natural (m ³ /ton)	Fuel oil (L/ton)
Papel y cartón	1.216	4	241	8
Vidrio	22	9	101	1
Metales ferrosos		18	128	229
Metales no ferrosos	907	33	119	5
Plásticos rígidos	689	9	26	9
Plásticos laminados	689	9	26	9

Por otro lado, deben considerarse las emisiones producidas en los propios procesos y aquellas asociadas a otros insumos auxiliares. En las siguientes tablas se muestran los factores de emisión para la fabricación de materiales vírgenes y reciclaje, según el material, de cada uno de los parámetros considerados.

Tabla 5.12. Factores de emisión según el material derivadas de la fabricación de materiales vírgenes (g/ton).

Fuente: (RTI International, 2003)

		Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	0	161.482	1.651.104	1.705.536	1.964.088	2.004.912
	CH ₄	SD	SD	2.095,63	557,93	SD	SD
	N ₂ O	SD	SD	SD	2,00	SD	SD
	SO _x	599	454	4.627	17.917	21.591	6.895
	NO _x	304	SD	2.504	14.833	17.781	10.251
	HCl	SD	SD	61,7	49,9	99,8	63,5
	NH ₃	SD	SD	SD	9,53	SD	SD
	Dioxinas y furanos	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Emisiones al agua	DQO	712	SD	SD	490	2.994	1.361
	N total	SD	SD	43,39	2,95	-0,0121	3,51
	P total	SD	SD	0,186	4,00E-03	2,962	1,48
	Dioxinas y furanos	SD	SD	SD	SD	SD	SD

Tabla 5.13. Factores de emisión según el material derivadas del reciclaje (g/ton).

Fuente: (RTI International, 2003)

		Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	0	SD	539.784	82.555	157.399	157.399
	CH ₄	SD	SD	1.170,29	SD	SD	SD
	N ₂ O	SD	SD	SD	SD	SD	SD
	SO _x	0,01	453,60	2.707,99	13,61	852,77	852,77
	NO _x	0,59	SD	1.601,21	14.560,56	1.642,03	1.642,03
	HCl	SD	SD	81,19	158,76	0,14	0,14
	NH ₃	SD	SD	SD	SD	SD	SD
	Dioxinas y furanos	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Emisiones al agua	DQO	4.944	SD	SD	68	274	274
	N total	SD	SD	0,73	308,45	0,06	0,06
	P total	SD	SD	1,12	0,83	0,00635	0,00635
	Dioxinas y furanos	SD	SD	SD	SD	SD	SD

Un problema que surge del planteo de los sistemas que incluyen el reciclaje de materiales corresponde a la asignación de un factor de emisión de CO₂ a la fabricación de papel y cartón virgen. Asumiendo que los bosques que suministran la materia prima para la fabricación de estos materiales son manejados de forma sustentable, durante el período de crecimiento de los árboles se produce una captación y fijación neta de CO₂ atmosférico que debe ser tenido en cuenta en la determinación del ICV (McDougall - White, 2004; Merrild, *et al*, 2008). Cabe mencionar que las emisiones producto del uso de energía y combustibles son consideradas aparte.

Por lo tanto, es necesario definir adecuadamente los límites del sistema y tener presente lo que esto implica, ya que cualquiera de los criterios adoptados condiciona los resultados del ICV. De acuerdo a las referencias bibliográficas consultadas, existen distintos puntos de vista para abordar este tema.

En general se asume que el reciclado de papel trae como consecuencia una reducción en la demanda de papel virgen, evitando el uso de las materias primas utilizadas en su fabricación y permitiendo así que el suelo forestado pueda ser utilizado para otros usos (European Environmet Agency, 2006). Como ya fue mencionado, esto no siempre se cumple, ya que la

funcionalidad de los materiales reciclados no necesariamente es la misma que la de los materiales vírgenes.

Existen referencias internacionales que suponen que, ante una reducción de la demanda de papel virgen, el área forestada sufriría un cambio en el uso de la tierra a través del cual los bosques serían cortados y el área transformada, por ejemplo, para un uso agrícola-ganadero (RTI International, 2003; McDougall - White, 2004). De esta manera, el sistema de gestión de los residuos de papel (reciclaje de papel provenientes de residuos desplazando la fabricación de papel virgen) deja de poseer capacidad de secuestrar carbono y, dependiendo de la actividad alternativa que se instale, puede actuar como un emisor neto de CO₂ (RTI International, 2003).

En contraposición, es posible suponer que los bosques que no son utilizados en la fabricación de papel virgen debido al desplazamiento provocado por el reciclaje, permanecen en pie y no se les da ningún otro uso alternativo (US EPA, 1998). De esta manera, el sistema actúa como un sumidero neto de carbono, al cual se le asigna una emisión de CO₂ negativa. Sin embargo, esta hipótesis es muy poco probable que ocurra en nuestro país.

Otra alternativa posible corresponde a la utilización de los bosques que dejan de abastecer la producción de papel virgen para otra actividad, como puede ser la generación de energía eléctrica. Esto implicaría que, no sólo el sistema se comporta como un sumidero de carbono a través de los bosques que permanecen en pie, sino que la energía eléctrica generada, cuyas emisiones de CO₂ se consideran neutras por provenir de un ciclo corto de carbono, desplaza a las emisiones producidas por la matriz eléctrica actual. Cabe mencionar que bajo dicha suposición, es necesario determinar la nueva tasa a la que estos bosques son cosechados para abastecer esta nueva actividad (Merrild, *et al*, 2008).

La asignación de un factor de emisión de CO₂ bajo esta hipótesis, implica relacionar la cantidad de papel y cartón reciclado, con el área forestada y la generación eléctrica en la sustitución de la fabricación de papel virgen, lo cual escapa a los objetivos del análisis.

Por lo tanto, dadas las diversas alternativas posibles y la dificultad en la predicción de cuál escenario prevalecería ante el aumento de la tasa de reciclaje de papel, en el presente estudio se asume un factor de emisión de CO₂ igual a cero para la fabricación de papel virgen, no considerando lo que

ocurre con los bosques que dejan de ser utilizados debido a la sustitución de papel virgen por el reciclaje de residuos.

Otro aspecto que llama la atención a partir de los valores de la Tabla 5.12, corresponde a los elevados factores de emisión de fósforo asociados a la fabricación de plásticos vírgenes. Esto se debe al uso de aditivos en base a compuestos de fósforo como retardantes de llama, propiedad requerida en la producción de plásticos con lo cual se logra enlentecer la combustión espontánea de estos materiales.

5.8 Tratamiento biológico

Los residuos que ingresan a la planta de tratamiento biológico corresponden a la fracción húmeda separada en origen, almacenadas en contenedores especiales para recibir esta fracción y recolectada de forma separada al resto de los residuos. Dado este sistema de recolección, se puede considerar que estos materiales se encuentren mayoritariamente libres de contaminantes.

Se adopta como localización de la planta de tratamiento biológico el mismo predio del SDF de Felipe Cardozo, por lo que ya se cuenta con las correspondientes infraestructuras y vías de acceso.

La tecnología seleccionada para el tratamiento anaerobio corresponde al sistema DRANCO desarrollado por la empresa Organic Waste Systems (OWS N.V.) de origen belga, que consiste en una digestión seca de la Fracción Orgánica de los RSU (FORSU) llevada a cabo en un reactor vertical de flujo descendente¹¹.

Previamente a su ingreso al sistema de tratamiento anaerobio, la fracción húmeda recolectada debe ser acondicionada, retirando los materiales extraños (vidrios, plásticos, textiles, etc.), los cuales son incorporados a la corriente de la fracción mixta.

De acuerdo a datos de la empresa respecto al desempeño del sistema, la generación promedio de biogás es de 126 m³/ton de residuos tratados, cuyo contenido de metano (CH₄) es del 55 %. Por su parte, la producción de compost luego de la maduración aerobia alcanza el 42 % respecto a la masa de los residuos que ingresan al sistema, con una concentración de sólidos de aproximadamente 40 %. En cuanto al consumo de energía eléctrica en el tratamiento, ésta se puede estimar en 93 kWh/ton de residuos tratados (Baere, S/A).

¹¹http://www.ows.be/household_waste/dranco/

Respecto a las emisiones producidas por el propio tratamiento biológico, en la Tabla 5.14 se detallan los valores adoptados en base a la cantidad de residuos tratados. Para el caso de las emisiones al aire se asumen valores según bibliografía; mientras que para las emisiones al agua, las cuales se producen básicamente a través del lixiviado producto del compostaje, se supone que los factores de emisión son tales que las emisiones resultantes cumplen con los límites de vertido establecidos en el Decreto 253 del año 1979 y modificaciones posteriores, asumiendo vertido a curso de agua.

De acuerdo a la Dirección Nacional de Meteorología¹², la precipitación acumulada media anual registrada en la estación de medición ubicada en Carrasco alcanza un valor de aproximadamente 1.100 mm. Si se asume que el 25 % de las precipitaciones se convierte efectivamente en lixiviados (Guinée, 2004) y una profundidad de materiales orgánicos en el compostaje de 2 m, teniendo en cuenta una densidad del compost de 326 kg/m³, es posible determinar una producción anual de lixiviados de aproximadamente 420 L/ton de materiales tratados. De esta manera, considerando los límites de vertido y el volumen de lixiviados producidos, son estimadas las emisiones al agua respecto a la cantidad de residuos tratados.

¹²<http://meteorologia.gub.uy/index.php/estcli>

Cabe mencionar que las emisiones al aire de CH₄ corresponden únicamente a las emisiones que ocurren durante el compostaje del material, asumiendo que las pérdidas durante la digestión anaerobia son despreciables.

Según la bibliografía consultada, los factores de emisión utilizados corresponden al tratamiento de los residuos únicamente por compostaje (Komilis - Ham, 2000), por lo que su utilización en el sistema planteados tiende a ser conservadora, ya que se realiza una etapa previa de digestión anaerobia en la cual ocurren gran parte de las emisiones de metano y amoníaco.

Tabla 5.14. Factores de emisión para el tratamiento biológico (g/ton).
Fuente: (Komilis - Ham, 2000, para emisiones al aire; y según descripción para emisiones al agua)

Parámetro		Factor
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	0
	CH ₄	20
	N ₂ O	SD
	SO _x	SD
	NO _x	SD
	HCl	SD
	NH ₃	498,96
	Dioxinas y furanos	SD
Emisiones al agua	DQO	25,3
	N total	2,1
	P total	2,1
	Dioxinas y furanos	SD

En cuanto a los productos del tratamiento, cabe recordar que parte del biogás generado es enviado hacia la planta de incineración para ser utilizado como combustible auxiliar (ver 5.5 Incineración). El resto del biogás alimenta una unidad de generación de energía eléctrica para consumo propio y exportación a la red, asumiendo que ésta desplaza el sistema tradicional asociado al uso de energía eléctrica, ya descrito anteriormente (ver 5.3 Combustible y energía eléctrica).

Se adopta un sistema de cogeneración de energía eléctrica a partir de biogás a través de un motor de combustión interna acoplado a un generador, cuya eficiencia de generación es del 30 %, y el aprovechamiento de la energía térmica para la calefacción del digestor. En este caso el biogás debe ser secado, filtrado y desulfurizado previo a ser utilizado en la generación eléctrica para evitar daños de los equipos (McDougall - White, 2004). Los factores de emisión por esta operación se detallan en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15. Factores de emisión para la generación eléctrica a partir de biogás en un motor de combustión interna (g/ton).

Fuente: (McDougall - White, 2004)

Parámetro		Factor
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	0
	CH ₄	0
	N ₂ O	SD
	SO _x	2,20E-02
	NO _x	1,17
	HCl	1,50E-02
	NH ₃	SD
	Dioxinas y furanos	3,30E-09

Respecto al compost producido, dado que se obtiene a partir de la fracción húmeda separada en origen y adecuadamente acondicionada, se considera que no presenta contaminación significativa de materiales tóxicos. Por lo tanto, se asume que este cumple con los parámetros de calidad necesarios para poder ser comercializado como bioabono apropiado para su aplicación como mejorador de suelos, sustituyendo la utilización de fertilizantes sintéticos.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta que para que la comercialización de este producto sea realmente viable, se requiere de la existencia de un mercado relativamente estable. En principio, se considera que el bioabono producido es destinado a abastecer la producción hortifrutícola ubicada en la zona de Montevideo rural y el Departamento de Canelones, o ser utilizado en

su aplicación a nivel municipal en plazas, parques y otros espacios públicos. La definición de estas alternativas condiciona las distancias recorridas desde la planta de compostaje hasta los puntos de aplicación considerados (5.4 Recolección y transporte).

Entre los nutrientes presentes en el compost, el más abundante es el nitrógeno, y si bien su concentración depende de la composición de los residuos a partir del cual se produce, de acuerdo a la referencia consultada (McDougall - White, 2004) el contenido de nitrógeno en el compost puede alcanzar el 1,1 % en base húmeda para el tratamiento separado de la fracción húmeda.

De esta manera es posible desplazar la producción y uso de fertilizantes químicos nitrogenados por el uso de compost producido en el tratamiento biológico. De acuerdo a la base de datos de ciclo de vida del National Renewable Energy Laboratory de los Estados Unidos¹³, el consumo de energía eléctrica en la fabricación de fertilizantes es de 50,7 kWh/ton de nitrógeno, mientras que el consumo de gas natural en el proceso alcanza un valor de 946 m³/ton de nitrógeno contenido en el fertilizante. Por su parte, el resto de las emisiones derivadas del propio proceso de producción se

¹³<https://www.lcacommons.gov/nrel/>

determinan a partir de los factores de emisión que se muestran en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16. Factores de emisión para la fabricación de fertilizantes químicos (g/ton de N).

Fuente: National Renewable Energy Laboratory
(<https://www.lcacommons.gov/nrel/>)

Parámetro		Factor
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	531.000
	CH ₄	215
	N ₂ O	3.100
	SO _x	SD
	NO _x	140
	HCl	SD
	NH ₃	405
	Dioxinas y furanos	SD

5.9 Disposición final

En el presente estudio se considera únicamente el SDF de Felipe Cardozo ubicado en la ciudad de Montevideo, ya que éste recibe actualmente el 85 % aproximadamente de los residuos generados en el AMM. A su vez, dado que el objetivo del análisis es de carácter prospectivo en el largo plazo, se asume operativa la celda de seguridad para residuos peligrosos que será instalada por iniciativa de la Cámara de Industrias del Uruguay (CIU) en las propias instalaciones de Felipe Cardozo.

De acuerdo a los sistemas y escenarios de gestión de RSU planteados, los residuos que ingresan al SDF pueden ser la fracción mixta, las cenizas y lodos de la planta de incineración, y el compost producido en el tratamiento biológico.

Se asume un peso específico medio para la fracción mixta compactada en el SDF de 700 kg/m^3 (CEMPRE, 2010), mientras que para las cenizas provenientes del incinerador, se asume un valor de 950 kg/m^3 . Este valor surge de adoptar un contenido de 77 % de cenizas y lodos (800 kg/m^3), 1 % de metales no ferrosos (700 kg/m^3), 7 % de metales ferrosos (1.500 kg/m^3) y 15 % de vidrio (1.600 kg/m^3) (Tchobanoglous, 1994).

En cuanto a los parámetros de desempeño del SDF, dado que no se cuenta con datos a nivel local, se adoptan los valores obtenidos de las referencias internacionales consultadas (CEMPRE, 2010; McDougall - White, 2004). De esta manera, se asume un consumo de gas oil en el uso de maquinaria y vehículos de llenado y compactación del SDF de $0,6 \text{ L/m}^3$ de espacio llenado en el SDF. Por otro lado, el consumo de energía eléctrica, principalmente empleada en el tratamiento de los lixiviados, puede asumirse en $0,15 \text{ kWh/m}^3$ de volumen ocupado en el SDF (McDougall - White, 2004).

La generación de biogás en el SDF sólo se da por la descomposición anaerobia de la materia orgánica, la cual se asume de aproximadamente 250 m³/ton de fracción orgánica presente en los residuos ingresados y un contenido de metano de 55 %, de acuerdo a datos de bibliografía. (McDougall - White, 2004). Se considera que la generación de biogás derivada de la disposición de compost como material de cobertura es despreciable, ya que se asume que el mismo se encuentra suficientemente estabilizado, al igual que las cenizas y lodos de la planta de incineración.

Se adopta que el sistema de recolección de biogás del relleno alcanza una eficiencia máxima del 90 % respecto al total del biogás generado, es decir que siempre existirá al menos un 10 % inevitable de fugas a la atmósfera. Para el caso en el cual el SDF no cuente con un sistema de recolección, las pérdidas son del 100 % del biogás generado.

El biogás recolectado puede ser quemado en una antorcha o utilizado para la generación de energía eléctrica en un motor de combustión interna para consumo en el propio SDF y exportación a la red. En este caso, el sistema de energía eléctrica es el mismo que los ya descritos anteriormente (ver 5.8 Tratamiento biológico). En la siguiente tabla se detallan los factores de emisión para la quema en antorcha.

Tabla 5.17. Factores de emisión para la quema de biogás en antorcha (g/m³).

Fuente: (McDougall - White, 2004)

Parámetro		Factor
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	0
	CH ₄	0
	N ₂ O	SD
	SO _x	0,05
	NO _x	0,2
	HCl	0,03
	NH ₃	SD
	Dioxinas y furanos	1,80E-04

Por su parte, la producción de lixiviados, así como su composición, depende de la naturaleza de los residuos, el método de disposición, el nivel de compactación, del diseño del sistema de recolección y de la precipitación pluvial en la región.

Realizando el mismo razonamiento que para el Tratamiento Biológico en cuanto a la determinación de la generación de lixiviados, asumiendo en este caso una profundidad de residuos en el SDF de 4 m y la densidad de los residuos en el SDF es de 700 kg/m³, es posible estimar una producción de lixiviados de aproximadamente 100 L/año por ton de residuos compactados en el SDF. El tiempo durante el cual se generan los lixiviados depende de la operación del SDF y del tipo de recubrimiento utilizado.

En cuanto a la composición de los lixiviados, se asume que éstos son tratados por aireación previamente a su descarga al ambiente, por lo que tanto para la fracción mixta como para compost se adjudica una concentración correspondiente a los límites de vertido a curso de agua para cada contaminante según el Decreto N° 253 de 1979 y modificaciones posteriores. Dado que no existen límites de vertido para dioxinas y furanos, se adopta una concentración de este parámetro según referencias consultadas (McDougall - White, 2004). Por su parte, se adoptan valores de bibliografía para la composición de lixiviados provenientes de la disposición de cenizas (McDougall - White, 2004)

En la siguiente tabla se muestra la composición asumida de los lixiviados y la carga contaminante correspondiente, según la fracción de residuos.

Tabla 5.18. Factores de emisión en los lixiviados según la fracción de residuos que se dispone en SDF.

Fuente: (McDougall - White, 2004, para cenizas; y según descripción para compost y fracción mixta)

Parámetro		Composición de lixiviados (mg/L)			Carga contaminante (g/ton)		
		Compost	Cenizas	Fracción mixta	Compost	Cenizas	Fracción mixta
Emisiones al agua	DQO ¹⁴	60	24	60	6	2,4	6
	N total	5	0,005	5	0,5	5E-04	0,5
	P total	5	SD	5	0,5	0	0,5
	Dioxinas y furanos	3E-08	3E-09	3E-08	3E-9	3E-10	3E-9

¹⁴ Si bien el Decreto N° 253 de 1979 y modificaciones posteriores no considera un límite para el vertido de DQO, se adopta el valor correspondiente para DBO₅.

6. APLICACIÓN DEL MODELO DE ACV

6.1 Introducción

Un modelo de ACV consiste esencialmente en una representación matemática de los flujos de materia y energía que vinculan los procesos unitarios de un sistema de producto. Este modelo se basa en el diseño genérico de los procesos y la información respecto a su operación y desempeño, a través del cual se determina el ICV del sistema modelado, así como las categorías de impacto.

Su objetivo principal es la predicción de las cargas ambientales de un sistema de gestión de residuos, incluyendo todos los procesos unitarios que lo componen. La importancia de desarrollar un modelo radica en proporcionar una metodología simple para la optimización de las operaciones planteadas, evaluando de forma global todos los escenarios alternativos y así poder identificar los factores de mayor sensibilidad del sistema, algunos de los cuales pueden no ser siempre tenidos en cuenta (McDougall - White, 2004).

A su vez, los resultados obtenidos a través del modelo pueden ser complementados con la información económica de los procesos llevados a cabo, facilitando la evaluación de las alternativas costo-efectivas, además de aceptables desde un punto de vista técnico y ambiental.

Si bien existen numerosos modelos desarrollados por distintas instituciones internacionales, la construcción de un modelo propio permite su diseño a medida y la posibilidad de incluir datos específicos para el sistema según se adecuen de la mejor manera a la realidad local.

6.2 Modelos existentes de ACV

En los últimos años distintas instituciones a nivel mundial, en muchos casos con el apoyo de los gobiernos locales, han desarrollado modelos de ACV aplicados a la gestión de RSU, con el fin de contar con una herramienta que permita comparar distintos escenarios de la gestión de residuos y facilitar la toma de decisiones respecto a las estrategias a adoptar.

Estos modelos permiten la construcción y evaluación de sistemas, a través de la definición del flujo de materiales dirigidos a los distintos procesos unitarios. Si bien en algunos casos es posible para el usuario ingresar información específica local, estos generalmente poseen sus propios parámetros de desempeño de las operaciones modeladas.

Un ejemplo de esto es el modelo Municipal Solid Waste Decision Support Tool (MSW-DST) desarrollado por el Research Triangle Institute (RTI) en un trabajo conjunto con la U.S. Environmental Protection Agency y el U.S.

Department of Energy de los Estados Unidos, además de la participación de los gobiernos federales, estatales y locales, el sector privado y distintas universidades. El objetivo de la investigación fue la recopilación de información para la elaboración de un programa computacional y una base de datos para el apoyo en la evaluación de los costos relativos y el desempeño ambiental de las estrategias de gestión de RSU (Thorneloe *et al*, 2007).

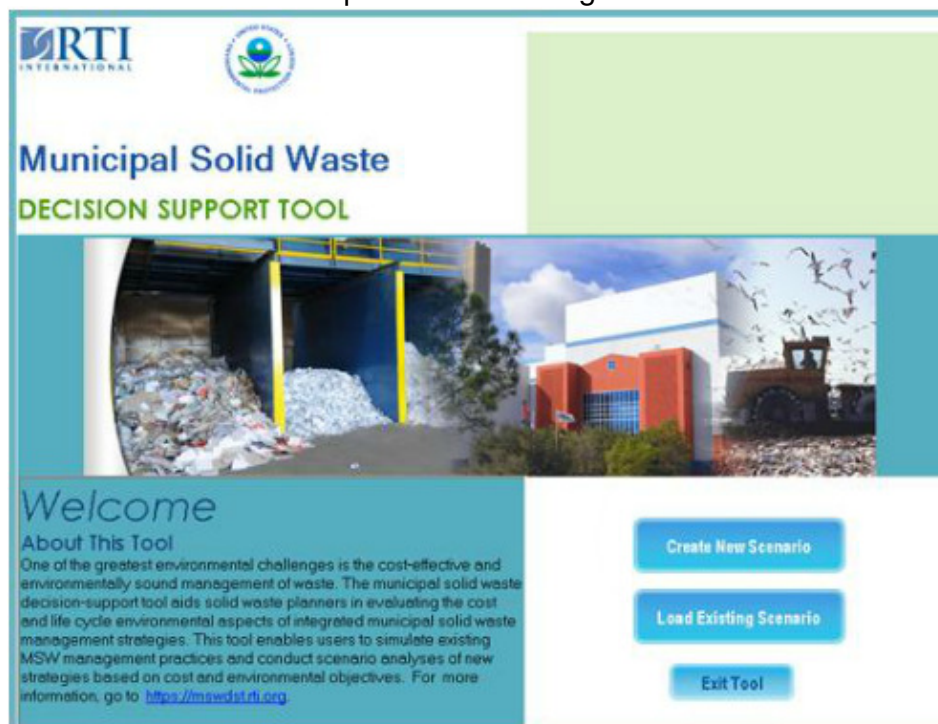
Este modelo consiste en la evaluación del ciclo de vida ambiental y la cuantificación de los costos totales de un sistema de gestión de RSU. Es posible la modelación de más de 40 procesos unitarios, cubriendo recolección, transporte, recuperación de materiales, estaciones de transferencia, tratamiento y disposición. El modelo determina los costos asociados al sistema, el consumo de energía y las emisiones de hasta 32 contaminantes en base a la cantidad y composición de los residuos manejados. Las categorías de impacto evaluadas son el cambio climático, acidificación, eutrofización, ozono troposférico, salud humana y ecotoxicidad.

Este modelo no se encuentra disponible con libre acceso para la población en general, por lo que no fue posible conocer el detalle de su funcionamiento;

solamente se pudo tener acceso a algunos de los tutoriales existentes en la página web del RTI para estudiar las generalidades de su aplicación.

Figura 6.1. Vista general del modelo computacional MSW-DST desarrollado por RTI International.

Fuente: <https://mswdst.rti.org/tutorial.htm>



Por otro lado se encuentra el modelo Integrated Waste Management IWM-2 desarrollado en el 2001 por F.R. McDougall con el apoyo de Procter & Gamble Industrial, S.C.A, a partir de su anterior versión del 1994. La aplicación para la cual fue diseñado es la optimización y comparación entre distintos escenarios de gestión de residuos existentes o propuestos, a partir de las cargas ambientales y costos de cada sistema. Este modelo se

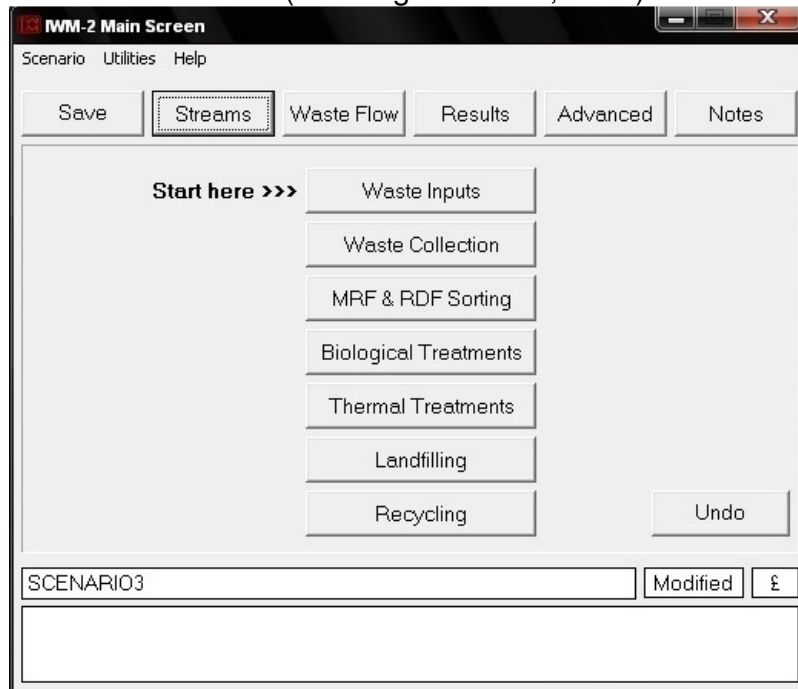
encuentra disponible junto a la publicación que describe su desarrollo (McDougall – White, 2004), y al cual fue posible acceder para corroborar su aplicación.

Las operaciones unitarias que pueden modelarse a través del IWM-2 son básicamente las mismas que para el modelo MSW-DST. Sin embargo, es posible diferenciar los residuos que ingresan según estos sean residuos domésticos comunes o voluminosos, que ingresan al sistema de recolección o en centros de acopio, residuos de jardín y residuos comerciales. Además, el modelo permite definir hasta 4 tipos distintos de recolección en la acera y 4 tipos de recolección en puntos de entrega voluntaria, lo cual, si bien agrega dificultad al modelo, posibilita un mejor ajuste a la realidad.

Entre los resultados del modelo se distinguen los costos asociados al sistema, el consumo y generación de los distintos energéticos, la generación final de residuos sólidos, y la emisión de 23 contaminantes al aire y de 27 al agua. La única categoría de impacto determinada por el modelo corresponde al calentamiento global.

Figura 6.2. Vista general del modelo computacional IWM-2 desarrollado por McDougall-White.

Fuente: (McDougall - White, 2004)



6.3 Desarrollo del modelo

El modelo desarrollado en el presente trabajo representa una herramienta genérica y lo suficientemente flexible que permite describir una gran variedad de sistemas y escenarios de gestión de RSU.

Para ello fue desarrollada una planilla de cálculo en Microsoft Excel en base a todas las consideraciones descritas en las secciones anteriores, tanto para la construcción de los sistemas de gestión de RSU y los escenarios a ser planteados, como en las operaciones unitarias que componen dichos

sistemas. Los resultados obtenidos consisten en el ICV del sistema de producto planteado, con las emisiones de los contaminantes analizados, así como las categorías de impacto y otros indicadores necesarios para la interpretación y evaluación del sistema.

La aplicación de la planilla de cálculo requiere que sean ingresados dos tipos de datos. Por un lado, la información relativa a los residuos que ingresan al sistema, es decir la cantidad, composición y como sus componentes se distribuyen entre las distintas corrientes del sistema; y la información respecto al desempeño de los procesos unitarios, o sea, los insumos de materiales y energía que son requeridos, y los factores de emisión de los contaminantes evaluados.

En cuanto a la asignación de los datos necesarios, éstos se relacionan en base a la masa de residuos que ingresan al sistema y a los componentes individuales específicos de cada corriente.

En la tabla a continuación se resumen los datos necesarios y la sección asociada dentro del presente informe.

Tabla 6.1. Datos necesarios para la planilla de cálculo del modelo de ICV.

Fuente: elaboración propia.

Hoja de cálculo	Descripción	Datos requeridos	Sección asociada
Diagrama de flujos	Presenta el diagrama de flujos de los residuos, indicando como se reparten las distintas fracciones entre los procesos unitarios	Cantidad y composición de los RSU que ingresan al sistema	3.3, 4.2, Tabla 3.1
		Tasa de separación en origen de los materiales desviados hacia la fracción seca y fracción húmeda	4.4.3, 4.4.4, Tabla 4.3
		Tasa de descarte de los materiales de la fracción seca y fracción en las plantas de clasificación	4.4.3, 4.4.4, Tabla 4.3
		Tasa de desvío de la fracción mixta hacia el SDF	Tabla 4.3
Pesos específicos	Reúne los pesos específicos de todas las corrientes de residuos consideradas de acuerdo a su composición	Peso específico de los materiales de todas las corrientes de residuos	Tabla 1.7
Energía y combustibles	Reúne los distintos aspectos asociados al uso de energía eléctrica y combustibles	Matriz de generación eléctrica	5.3, Tabla 5.3
		Factores de emisión de cada contaminante en el uso de combustibles fósiles	5.3, Tabla 5.1
		Factores de emisión de cada contaminante en la generación eléctrica según el combustible utilizado	5.3, Tabla 5.4
		Energía térmica contenida en los combustibles	5.3, Tabla 5.2

Tabla 6.1. Datos necesarios para la planilla de cálculo del modelo de ICV.(Cont.)

Fuente: elaboración propia.

Hoja de cálculo	Descripción	Datos requeridos	Sección asociada
Recolección y transporte	Presenta los datos y resultados asociados a la operación y desempeño del proceso de recolección y transporte de las distintas corrientes de residuos	Consumo específico de combustible según el tipo de camión recolector	5.4, Tabla 5.5
		Capacidad de carga según el tipo de camión recolector	5.4, Tabla 5.5
		Distancia media recorrida por circuito de recolección para cada fracción de residuos	5.4, Tabla 5.5
Incineración	Presenta los datos y resultados asociados a la operación y desempeño del proceso de incineración de residuos	Eficiencia de conversión de la energía en la generación de energía eléctrica	5.5
		Consumo de energía eléctrica y gas natural en la incineración	5.5
		Factores de emisión de cada contaminante en la incineración según el material	5.5, Tabla 5.7
		Factores de emisión de cada contaminante en la fabricación de insumos auxiliares	5.5, Tabla 5.8
		PCI de cada material	5.5, Tabla 5.6
		Tasa de utilización de biogás del tratamiento biológico como combustible auxiliar	5.5
		Tasa de recuperación de metales ferrosos	5.5
Plantas de clasificación	Presenta los datos y resultados asociados a la operación y desempeño de las plantas de clasificación de residuos	Consumo específico de energía y gas oil	5.6

Tabla 6.1. Datos necesarios para la planilla de cálculo del modelo de ICV. (Cont.)

Fuente: elaboración propia.

Hoja de cálculo	Descripción	Datos requeridos	Sección asociada
Reciclaje de materiales	Presenta los datos y resultados asociados a la operación y desempeño del proceso de reciclaje de materiales	Consumo de energía, gas natural, gas oil y fuel oil en la fabricación de materiales vírgenes según el material	5.7, Tabla 5.10
		Consumo de energía, gas natural, gas oil y fuel oil en el reciclaje según el material	5.7, Tabla 5.11
		Factores de emisión de cada contaminante en la fabricación de materiales vírgenes según el material	5.7, Tabla 5.12
		Factores de emisión de cada contaminante en el reciclaje según el material	5.7, Tabla 5.13
		Eficiencia de reciclaje según el material	5.7, Tabla 5.9
Tratamiento biológico	Presenta los datos y resultados asociados a la operación y desempeño del proceso de tratamiento biológico de residuos	Tasa de generación de biogás	5.8
		Contenido de metano en el biogás	5.8
		Tasa de producción de compost	5.8
		Contenido de nitrógeno en el compost	5.8
		Consumo de energía en el tratamiento biológico	5.8
		Consumo de energía y gas natural en la fabricación de fertilizantes	5.8
		Factores de emisión de cada contaminante en el tratamiento biológico y en la generación de energía	5.8, Tabla 5.14, Tabla 5.15
		Factores de emisión de cada contaminante en la fabricación de fertilizantes	5.8, Tabla 5.16
		Tasa de utilización de biogás en la sustitución de gas natural de la red	5.8
		Tasa de utilización de compost como bioabono	5.8
		Eficiencia de conversión de la energía en la generación de energía eléctrica	5.8

Tabla 6.1. Datos necesarios para la planilla de cálculo del modelo de ICV. (Cont.)

Fuente: elaboración propia.

Hoja de cálculo	Descripción	Datos requeridos	Sección asociada
Disposición final	Presenta los datos y resultados asociados a la operación y desempeño del proceso de disposición final de residuos	Tasa de generación de biogás según el material	5.9
		Contenido de metano en el biogás	5.9
		Consumo de energía y gas oil en la disposición final	5.9
		Factores de emisión de cada contaminante en la disposición final según el material	5.9, Tabla 5.18
		Factores de emisión de cada contaminante en la quema de biogás en antorcha y generación eléctrica	5.9, Tabla 5.17
		Tasa de recolección de biogás	5.9
		Tasa de quema de biogás en antorcha	5.9
		Tasa de utilización de biogás en la sustitución de gas natural de la red	5.9
Resultados	Presenta los resultados de ICV, indicadores y categorías de impacto, de forma global y separados por proceso unitario	Eficiencia de conversión de la energía en la generación de energía eléctrica	5.9
		Potencial de Calentamiento Global, Acidificación y Eutrofización para cada contaminante	4.6, Tabla 4.7, Tabla 4.8, Tabla 4.9

Este modelo se basa en datos generales, de manera que no brinda resultados tan exactos como otros posibles estudios específicos. Sin embargo, para los objetivos planteados, se considera de mayor utilidad la

flexibilidad del modelo y su capacidad de evaluar distintas situaciones propuestas.

Aparte de las limitaciones inherentes a la metodología de análisis (ver 2.7 Limitaciones del ACV), existen otras que surgen de la forma en que ha sido desarrollado el modelo.

En primer lugar, se puede mencionar el hecho de que las categorías de impacto se basan en relaciones puramente lineales y sin considerar aspectos locales, respecto a cómo estos impactos se producen.

Además, el modelo tal cual está planteado, no permite tener en cuenta factores de escala, por lo que las operaciones modeladas pueden no ser óptimas desde el punto de vista técnico del propio proceso, aunque puedan haber resultado de condiciones óptimas en relación a la cantidad de materiales procesados.

Por último, el modelo sólo admite un solo tipo de proceso en cada una de las operaciones unitarias, lo cual impide que puedan modelarse otros tipos de procesos o varios procesos simultáneos.

7. RESULTADOS DEL ICV

7.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en la aplicación del modelo de ACV desarrollado para cada uno de los sistemas y escenarios planteados. La interpretación de los resultados incluye la identificación de los aspectos de mayor significancia dentro de cada sistema, el análisis de sensibilidad de los factores de mayor incidencia y la comparación entre los escenarios propuestos.

Para ello, en primer lugar se analizan cada sistema en forma individual, observando el desempeño de los distintos escenarios a través de los distintos indicadores y categorías de impacto, para luego realizar la comparación entre los sistemas. De forma separada se evalúa el efecto en el cambio de composición de la corriente de residuos y como son afectados los desempeños de los sistemas.

Cabe mencionar que la nomenclatura utilizada para identificar los diferentes sistemas y escenarios sigue la lógica del resumen mostrado en la Tabla 4.2.

En el Anexo III se recopilan las planillas de resultados que devuelve el modelo aplicado para los Escenarios Principales.

7.2 Resultados

7.2.1 Sistema 0

El Sistema 0 incluye únicamente los procesos unitarios de recolección y transporte, y de disposición final de la totalidad de los RSU, siendo el Escenario Principal sin recolección de biogás (S0_EP). Como ya fue mencionado, este sistema se asemeja a la gestión actual de residuos, en el cual la disposición final de residuos constituye el principal proceso unitario, representando así al sistema de línea de base. Además, se plantean los escenarios de recolección de biogás para quema en antorcha (S0_E1) y generación de energía eléctrica para exportar a la red (S0_E2).

Según el modelo, el aporte al indicador de Calentamiento Global para el Escenario Principal (S0_EP) suma un total de **739 ktonCO₂eq/año**, de las cuales 9,2 ktonCO₂eq/año corresponden a la recolección y transporte, y 730 ktonCO₂eq/año a la disposición final, representando este último casi el 99 % del total. Esto se debe a las emisiones de CH₄ procedentes del SDF, las cuales alcanzan las 34,7 kton/año.

De acuerdo al Inventario Nacional de Emisiones Netas de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) del 2004 (Unidad de Cambio Climático - DINAMA - MVOTMA, 2010), las emisiones totales de CH₄ fueron de 887 kton, de las

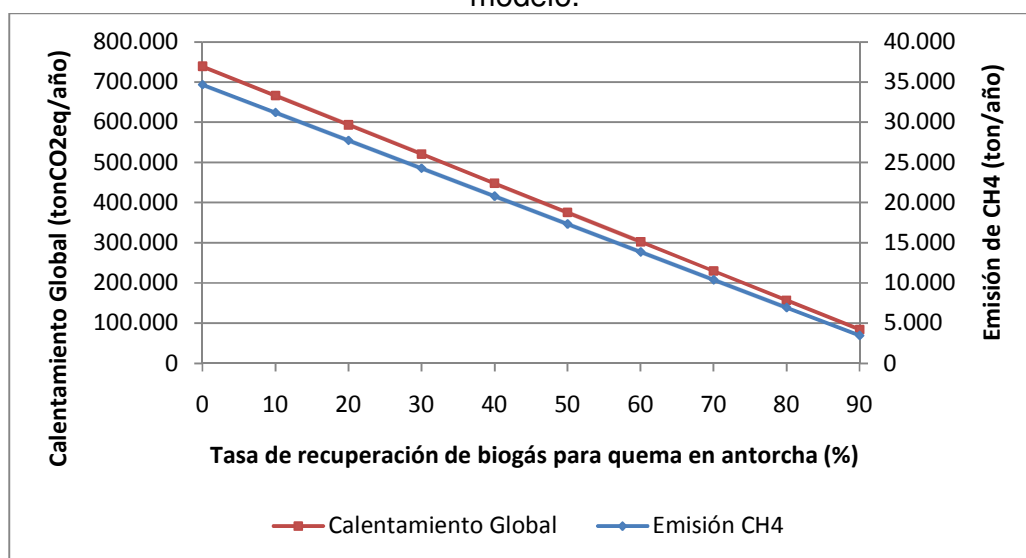
cuales se estima que 53,9 kton son debidas a la disposición de residuos sólidos en todo el país. Según el inventario, se considera que Montevideo contribuye con el 48,5 % de dichas emisiones, lo que equivale a 26,1 kton. Si se asume que Montevideo representa el 86 % de la generación total de residuos del AMM (ver 3.3 Generación de RSU en el AMM), se puede extrapolar un valor de emisiones de 30,3 kton de CH₄ para toda el AMM de acuerdo a los datos del inventario. Este valor es un 12 % inferior en comparación con los datos obtenidos por el modelo, siendo una diferencia aceptable si se tienen presentes todas las suposiciones realizadas.

Si se considera la recuperación de biogás y su quema en antorcha (S0_E1) se observa que tanto las emisiones de CH₄ como el indicador de Calentamiento Global disminuyen, debido al pasaje de CH₄ a CO₂ en la combustión y la consecuente disminución en el PCG. Para el escenario de recuperación del 90 % del biogás, valor máximo adoptado para asumir un mínimo de 10 % de fugas al ambiente, se observa que este indicador disminuye a **84,1 ktonCO₂eq/año**.

En el Gráfico 7.1 se observa este efecto en función de la tasa de recolección de biogás del SDF.

Gráfico 7.1. Calentamiento global y emisión de CH₄ en función de la tasa de recuperación de biogás para quema en antorcha en el Sistema 0.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



Por su parte, dado que la matriz de generación eléctrica adoptada (ver Tabla 5.3) asume solo un 7 % de generación a partir de fuentes fósiles, el escenario de recuperación de biogás para generación eléctrica (S0_E2) no logra una reducción significativa del Calentamiento Global, alcanzando las **77,0 ktonCO₂eq/año**, valor apenas 8 % inferior al escenario de quema en antorcha.

Respecto a los impactos de Acidificación y Eutrofización, el Escenario Principal alcanza valores de estos indicadores de **96,4 tonSO₂eq/año** y **4,4 tonPO₄eq/año**, respectivamente.

Si se considera la matriz eléctrica nacional (Proyección 2015) indicada en la Tabla 5.3 y los factores de emisión de los distintos contaminantes según el tipo de generación mostrados en la Tabla 5.4, es posible determinar que dicha matriz posee un Poder de Acidificación de 0,87 gSO₂eq/kWh. Asumiendo una generación media anual de 9.360 GWh, se puede concluir que la matriz eléctrica contribuye al impacto de Acidificación con una emisión de aproximadamente de 8.000 tonSO₂eq/año. Por lo tanto, el indicador de Acidificación correspondiente al Escenario Principal planteado representa el 1,2 % respecto al de la matriz eléctrica nacional.

Por su parte, si se considera los factores medios estimados de aporte de contaminantes per cápita en las aguas residuales domésticas crudas sin tratar (DBO₅: 90 g/hab·día; N total: 13,5 g/hab·día; P total: 4,0 g/hab·día) (Metcalf - Eddy, 1996), es posible determinar un Poder de Eutrofización de los efluentes domésticos de 19,9 gPO₄eq/hab·día. De esta manera, el Escenario Principal planteado representa una población equivalente de poco más de 600 habitantes.

En los Gráfico 7.2 y Gráfico 7.3 se muestra como varían los indicadores de Acidificación y Eutrofización al incrementarse la tasa de recolección de biogás del SDF para su quema en antorcha (S0_E1). Los aumentos

observados se deben al aumento de las emisiones de SO_x , NO_x y HCl , dado que se trata de gases que se forman en la combustión.

Gráfico 7.2. Acidificación y emisión de SO_x , NO_x y HCl en función de la tasa de recuperación de biogás para quema en antorcha en el Sistema 0.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.

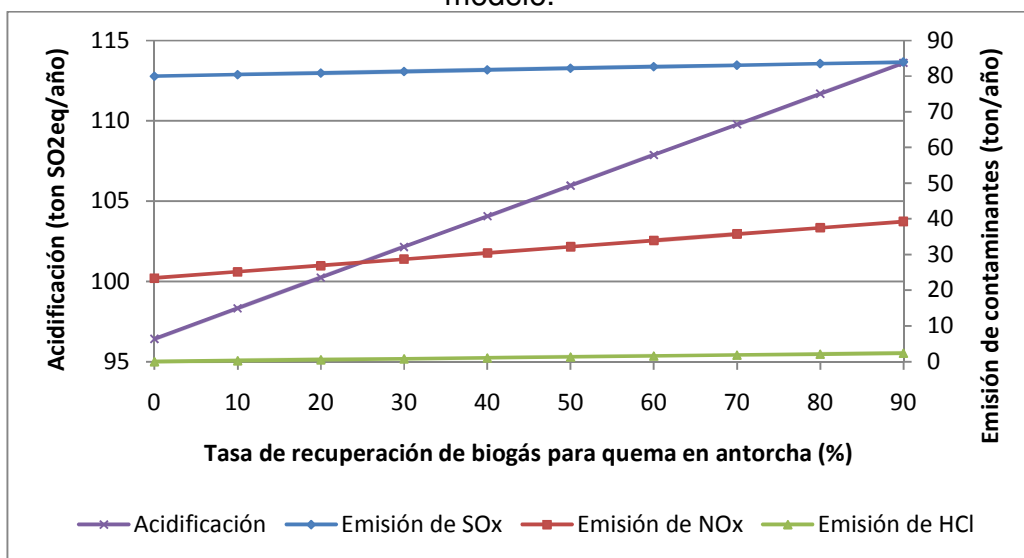
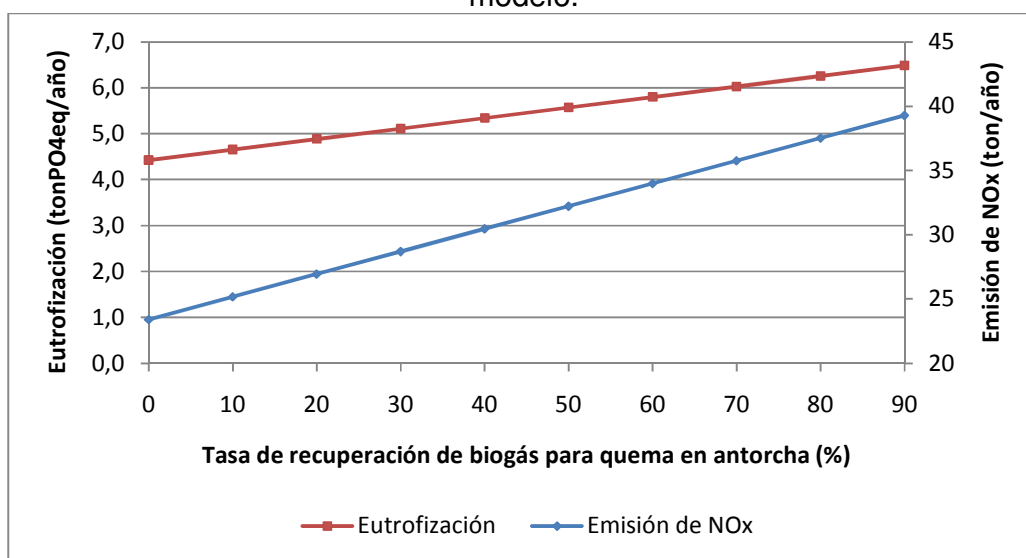


Gráfico 7.3. Eutrofización y emisión de NOx en función de la tasa de recuperación de biogás para quema en antorcha en el Sistema 0.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



En relación al consumo de combustible en la recolección y transporte, el cual es el mismo para todos los escenarios planteados, los resultados del modelo arrojan un valor de consumo de **2.625 m³/año** de gas oil, representando un consumo específico de 3,75 L/ton de residuos recolectados.

De acuerdo a los datos suministrados por la IdeM (ver 1.6 Aspectos económicos de la gestión), se estima un consumo total de gas oil por toda la División Limpieza de 1.980 m³/año.

La diferencia entre los resultados obtenidos y los registros de la IdeM se debe a que el modelo desarrollado supone la recolección de la totalidad de

los RSU generados, incluyendo los residuos que actualmente son recolectados por el sector informal y que representan el 22 % del total. Además, los datos de la IdeM reflejan el consumo únicamente en Montevideo y sólo por el servicio municipal, sin considerar el servicio de recolección en los otros departamentos del AMM, cuya población representa el 21 % de toda el AMM, ni por las empresas tercerizadas contratadas, las cuales dan servicio al 11 % de la población de Montevideo.

Teniendo en cuenta estos aspectos, se puede extrapolar los datos de la IdeM a todos los servicios de recolección de residuos de toda el AMM, resultando en un consumo de gas oil de 3.610 m³/año, siendo el resultado arrojado por el modelo 27 % menor a éste. Considerando que en el escenario real existen otros servicios no contemplados y la posible capacidad ociosa de los camiones en su recorrido, la diferencia entre ambos valores puede asumirse como aceptable.

Si se incluyen las tareas de disposición final, comprendiendo el traslado de los residuos, su compactación y otras operaciones necesarias en el SDF, donde el consumo de combustibles fue determinado por el modelo en 600.000 L/año, el consumo total de combustibles alcanza un valor de **2.979 tep/año**.

Por su parte, el consumo de energía eléctrica en este sistema es de **150 MWh/año** correspondientes principalmente al tratamiento de lixiviados en el SDF. Si se tiene en cuenta el volumen de lixiviados generados, 100 L/año por tonelada de residuos dispuestos (ver 5.9 Disposición final), con una composición bruta de 1.900 mgDBO₅/L, este consumo de energía coincide aproximadamente con el necesario para el tratamiento (1 kWh/kgDBO₅).

De esta manera, considerando combustibles y energía eléctrica, el balance neto de energía para todos los escenarios sin recuperación energética del biogás alcanza un valor de **125 TJ/año**.

Por otro lado, para el escenario de recuperación de biogás y generación eléctrica (S0_E2), el modelo arroja un balance neto de energía de **-73 TJ/año**. Este valor deriva de una generación neta de **139 GWh/año** de energía eléctrica para su exportación a la red, la cual representa el 1,4 % del consumo total promedio en el período 2009-2012 en nuestro país según datos de la DNE (Tabla 5.3).

Por último, en relación a la emisión de dioxinas y furanos, para el Escenario Principal (S0_EP) éstas sólo se dan a través del lixiviado generado en el SDF, significando emisiones de **2,1E-06 kgPCDD-PCDF/año**.

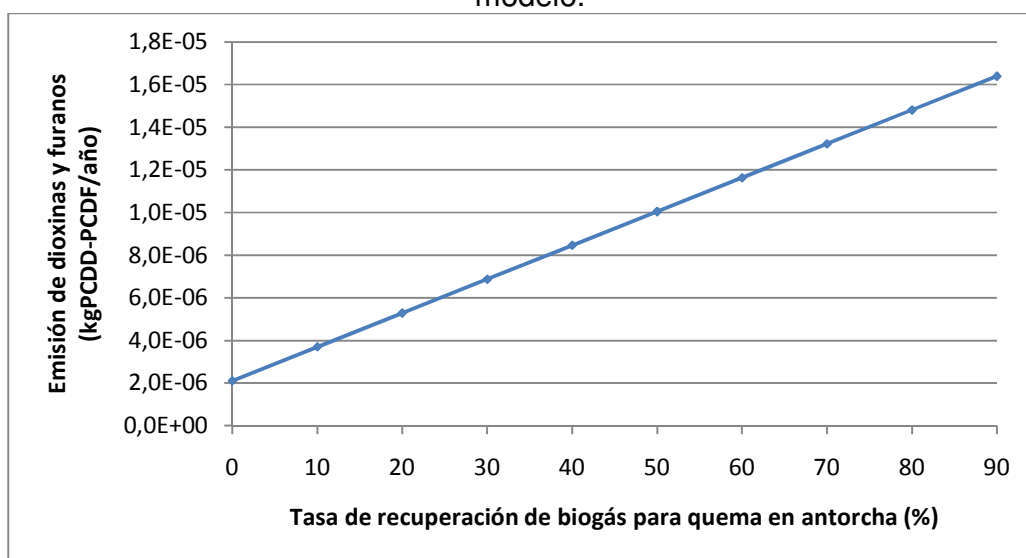
Según el Inventario Nacional de Liberaciones de Dioxinas y Furanos Uruguay 2002/2003 (DINAMA, 2002/2003), las emisiones ocurridas en los lixiviados de los SDF de todo el país fueron estimadas en $2,7E-06$ kgEQT/año¹⁵, representando el 0,005 % de las emisiones totales a nivel nacional. Asumiendo un factor de toxicidad equivalente (EQT) utilizado en las emisiones del modelo desarrollado igual a 1, se puede observar que existe una gran concordancia con los resultados obtenidos a partir del modelo. Cabe aclarar que si bien dicho inventario abarca la totalidad del país, la cantidad de residuos que son considerados es de 893.871 ton/año, siendo este valor apenas 27 % superior al considerado para toda el AMM en el presente trabajo.

Para los escenarios de recuperación de biogás y quema en antorcha (S0_E1), se suman las emisiones ocurridas durante la combustión, provocando un aumento de las emisiones al aumentar las tasas de recolección de biogás. En el siguiente gráfico se muestra esta evolución.

¹⁵ EQT: Equivalente de Toxicidad. Cada congénere de las familias de compuestos de PCDD-PCDF posee su propio EQT, tomando como 1 el EQT del 2,3,7,8-tetracloro dibenzo p-dioxina, por tratarse este el de mayor toxicidad. Al resto de los congéneres se le asigna una fracción de 1 (DINAMA, 2002/2003).

Gráfico 7.4. Emisión de dioxinas y furanos en función de la tasa de recuperación de biogás para quema en antorcha en el Sistema 0.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



7.2.2 Sistema 1

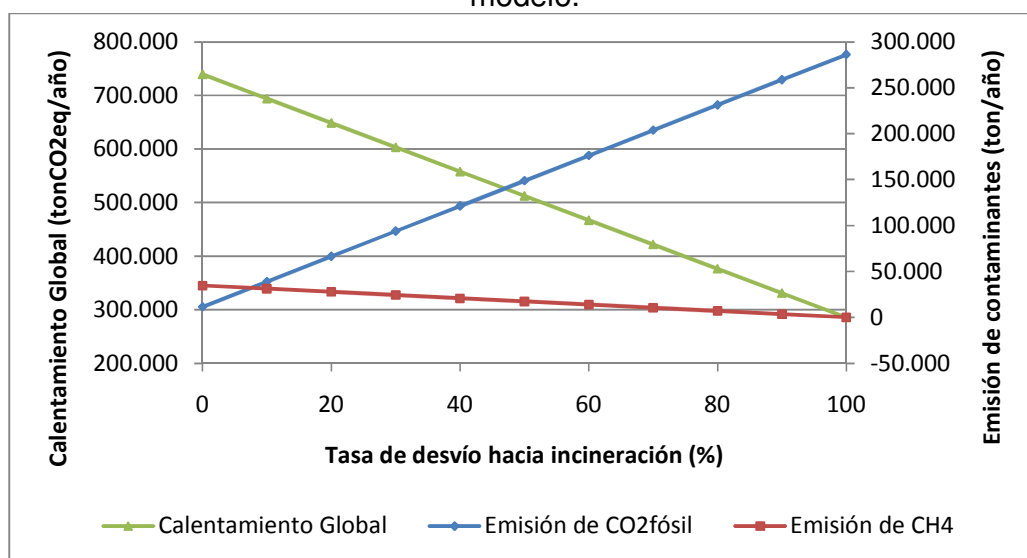
El Sistema 1 incorpora la incineración como proceso unitario, en el cual el Escenario Principal (S1_EP) recibe el 100 % de la fracción mixta, siendo las cenizas y los lodos resultantes enviados al SDF. Se analiza también cómo varía el sistema mediante el aumento progresivo de la tasa de desvío de residuos hacia la planta de incineración (S1_E1) y frente a la recuperación de metales ferrosos de las cenizas (S1_E2).

En relación al Calentamiento Global, se observa que el indicador asociado a este impacto disminuye al aumentar el desvío de residuos hacia la

incineración, producto de dos efectos contrapuestos. Por un lado, la emisión de CO_2 de origen fósil aumenta debido a la quema de plásticos, aunque también disminuye en menor medida por desplazamiento de la energía eléctrica tradicional por la energía generada. Por otro lado, la emisión de CH_4 disminuye a causa de una menor cantidad de residuos orgánicos biodegradables enviados al SDF. Este último aspecto predomina en el total, dado que el Poder de Calentamiento Global del CH_4 es 21 veces mayor al del CO_2 . Esto resulta en una disminución del Calentamiento Global hasta alcanzar un indicador de **285 kton CO_2 eq/año** para una tasa de incineración del 100 % de los RSU generados. En el Gráfico 7.5 se muestra este efecto.

Gráfico 7.5. Calentamiento Global y emisión de CO₂ fósil y CH₄ en función de la tasa de desvío hacia incineración en el Sistema 1.

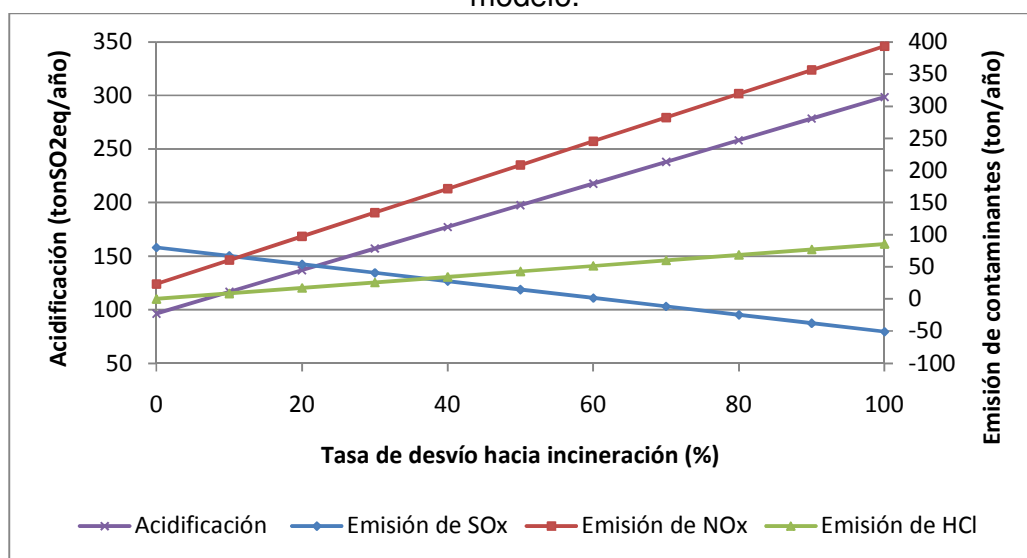
Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



El indicador de Acidificación causado por este sistema presenta un aumento producto de dos efectos opuestos a medida que se eleva la tasa de desvío hacia la incineración. La quema masiva de residuos en la incineración provoca el aumento de las emisiones, mientras que la energía eléctrica desplazada de la red las reduce. En el conjunto, este indicador aumenta al incrementar la tasa de incineración debido al aumento de las emisiones de NO_x, como se muestra en el Gráfico 7.6.

Gráfico 7.6. Acidificación y emisión de SO_x, NO_x y HCl en función de la tasa de desvío hacia incineración en el Sistema 1.

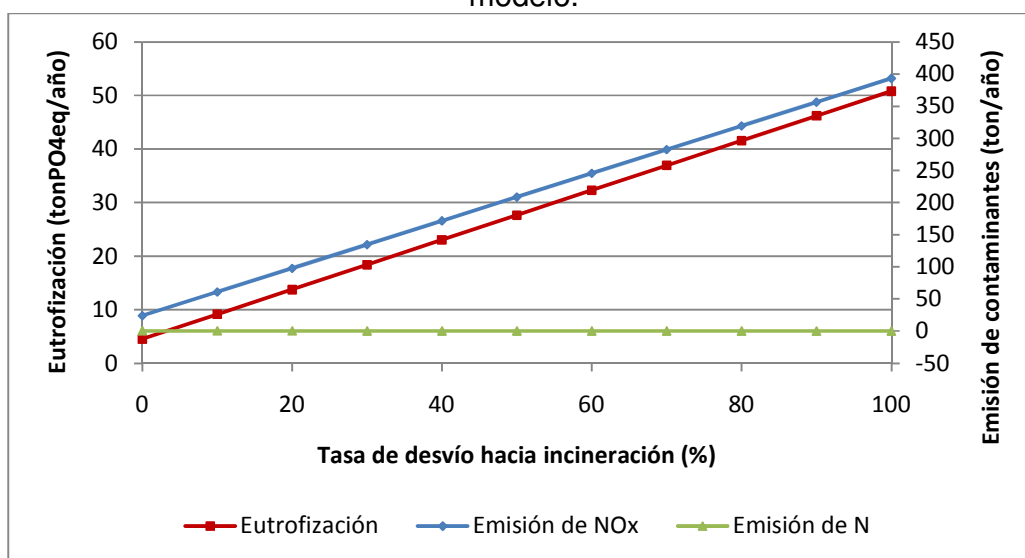
Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



En cuanto a la Eutrofización, si bien a mayor tasa de incineración disminuyen las emisiones al agua de DQO, nitrógeno y fósforo, ya que la cantidad de residuos enviados al SDF es menor, evitando la generación de lixiviados; al igual que para la Acidificación, el aumento de las emisiones de NO_x posee un mayor peso en el total que se refleja en el aumento del indicador de este impacto a pesar del relativamente bajo Poder de Eutrofización que presenta el NO_x.

Gráfico 7.7. Eutrofización y emisión de NO_x y N en función de la tasa de desvío hacia incineración en el Sistema 1.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



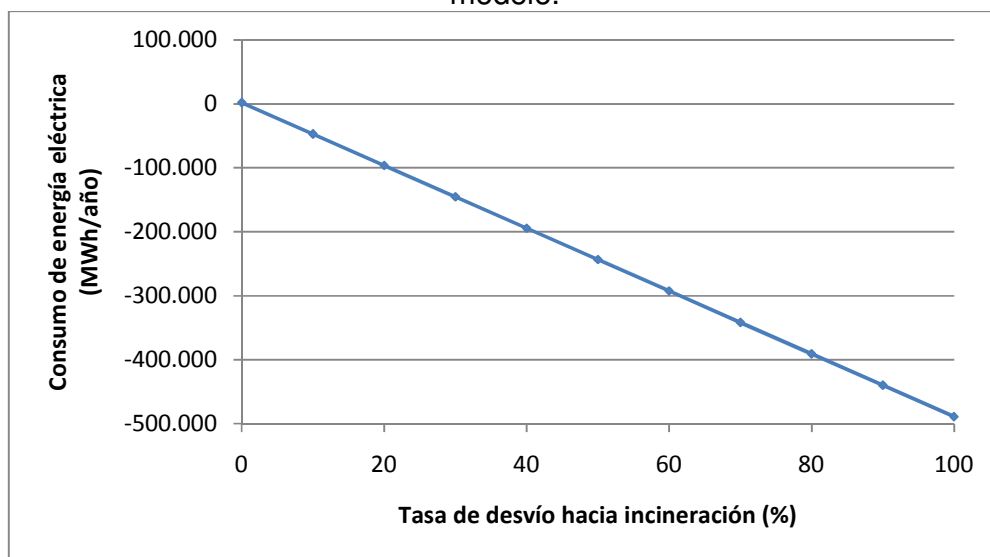
Por otro lado, al aumentar la tasa de desvío de residuos hacia la incineración, disminuye el volumen ocupado en el SDF hasta alcanzar los **202.676 m³/año**, correspondientes a 142 kton/año, para el escenario de incineración del 100 % de los residuos (S1_EP), lo cual significando una reducción del volumen del 80 % respecto al Sistema 0.

En relación a la generación eléctrica en la planta de incineración, en el Gráfico 7.8 se muestra su evolución en función de la tasa de incineración de residuos. Como se puede observar, la generación neta de energía eléctrica para exportación a la red en el escenario de 100 % de incineración alcanza un valor de **489 GWh/año**, equivalentes a una potencia de generación de 56

MW. De esta manera, dicho escenario posee una capacidad potencial de generación eléctrica para abastecer el 5 % del consumo total del país de acuerdo al promedio del período 2009 - 2012, según datos de la DNE (Tabla 4.3).

Gráfico 7.8. Consumo de energía eléctrica en función de la tasa de desvío hacia incineración en el Sistema 1.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.

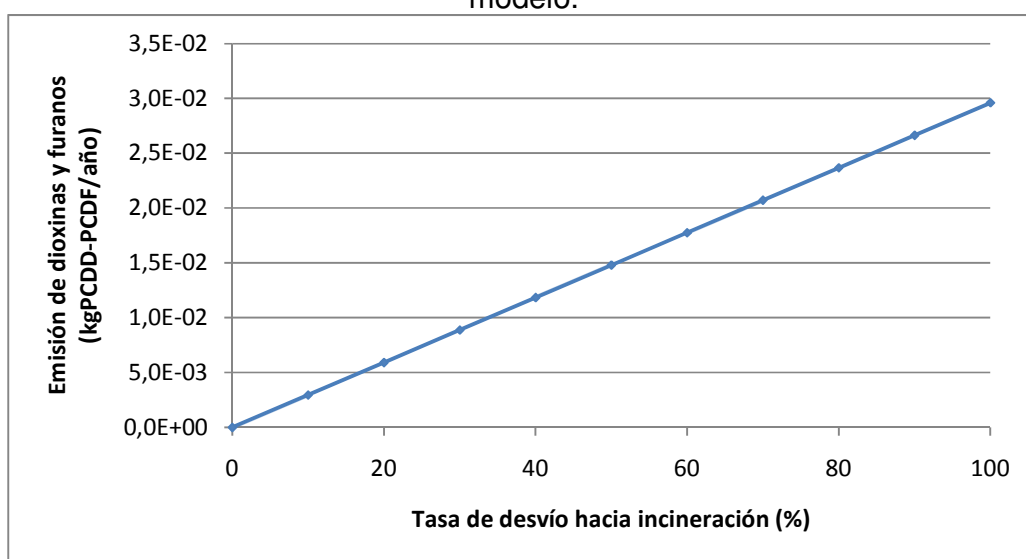


Más allá que al desviar los residuos hacia la incineración, la producción de lixiviados en el SDF disminuye y con éstos la emisión de dioxinas y furanos, la liberación de estos contaminantes durante la combustión de los residuos en el proceso de incineración es considerablemente mayor. De esta manera, la emisión de estos contaminantes aumenta hasta alcanzar un valor de **3,0E-2 kgPCDD-PCDF/año**, representando aproximadamente el 54 % de las

emisiones actuales totales del país según el inventario nacional (DINAMA, 2002/2003).

Gráfico 7.9. Emisión de dioxinas y furanos en función de la tasa de desvío hacia incineración en el Sistema 1.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



Por último, se analiza el escenario de recuperación del 90 % de los metales ferrosos presentes en las cenizas de la planta incineradora para la incineración del 100 % de los residuos (S1_E2). De esta manera, se alcanza una tasa global de recuperación de materiales de **2,8 %**, correspondientes a 24 kton/año de metales ferrosos recuperados.

Uno de los principales efectos asociados a este escenario corresponde a una significativa disminución de las emisiones de SO_x y NH_3 , debido al

desplazamiento del sistema de producción de metales ferrosos a partir de materiales vírgenes. Esto provoca la reducción del impacto de Acidificación hasta alcanzar un indicador de **-0,24 ktonSO₂eq/año**, lo que invierte la tendencia mostrada en el Escenario Principal.

Además, se observa una importante reducción del consumo de combustibles, significando un ahorro neto de **12.518 tep/año**.

7.2.3 Sistema 2

En el Sistema 2 se incluye la posibilidad de clasificación en origen de residuos y separación de los materiales reciclables, los cuales son recolectados y desviados a sus respectivas plantas de reciclaje para la fabricación de nuevos productos. Es así que a partir del Escenario Principal del Sistema 1, en el cual es incinerada la totalidad de los residuos, se aumenta progresivamente la tasa de separación en origen de los distintos materiales (S2_E1) hasta alcanzar las tasas de separación indicadas en la Tabla 3.3 (S2_EP). Además, se estudian los efectos producidos por el aumento de las tasas de separación de papel y cartón, y plásticos (S2_E2).

De acuerdo a los resultados obtenidos, las tres categorías de impacto evaluadas disminuyen al aumentar las tasas de separación en origen y

reciclaje de los distintos materiales. Esto se debe a la disminución de las emisiones al aire de todos los parámetros analizados, siendo el ahorro en el consumo de energía eléctrica y combustibles debido a la sustitución de materiales vírgenes el aspecto de mayor influencia en el desempeño global.

A continuación se muestra la evolución de los indicadores de las categorías de impactos analizadas y de las correspondientes emisiones de contaminantes en función de la tasa global de recuperación, a partir del escenario de incineración total de residuos (S1_EP) hasta alcanzar las tasas máximas de separación en origen planteadas (S2_EP), variando proporcionalmente las tasas individuales de los distintos materiales. Es así que para el Escenario Principal (S2_EP) se alcanzan valores de los indicadores de categoría de impacto de **88 ktonCO₂eq/año** para Calentamiento Global, **-1,46 ktonSO₂eq/año** para Acidificación y **-13,8 tonPO₄eq/año** para Eutrofización.

Gráfico 7.10. Calentamiento Global y emisión de CO₂ fósil y CH₄ en función de la tasa global de recuperación de materiales en el Sistema 2.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.

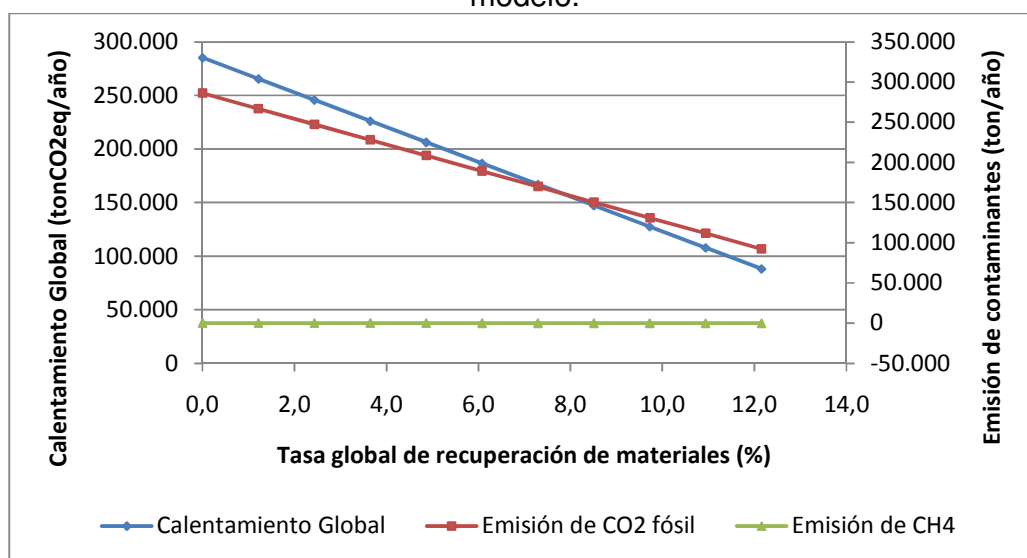


Gráfico 7.11. Acidificación y emisión de SO_x, NO_x y HCl en función de la tasa global de recuperación de materiales en el Sistema 2.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.

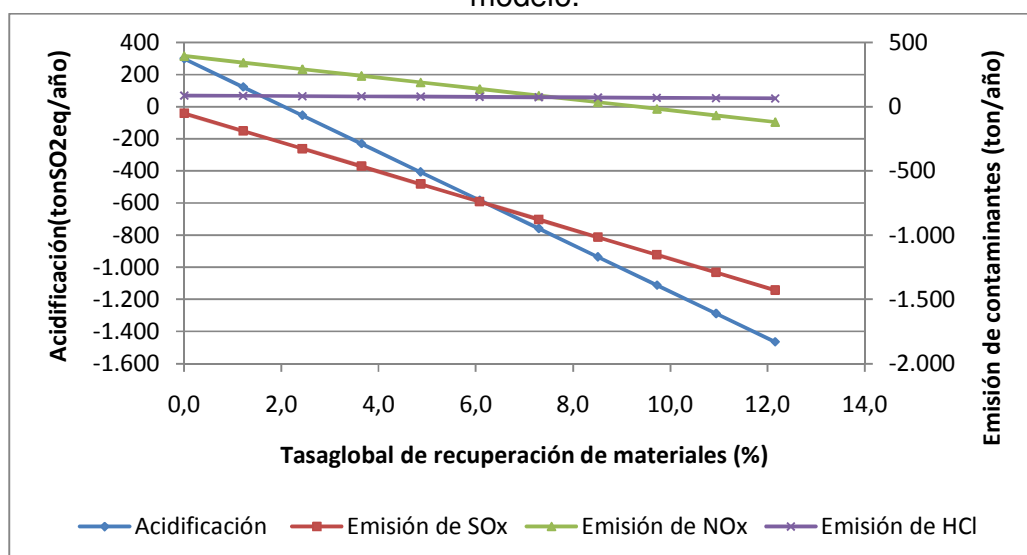
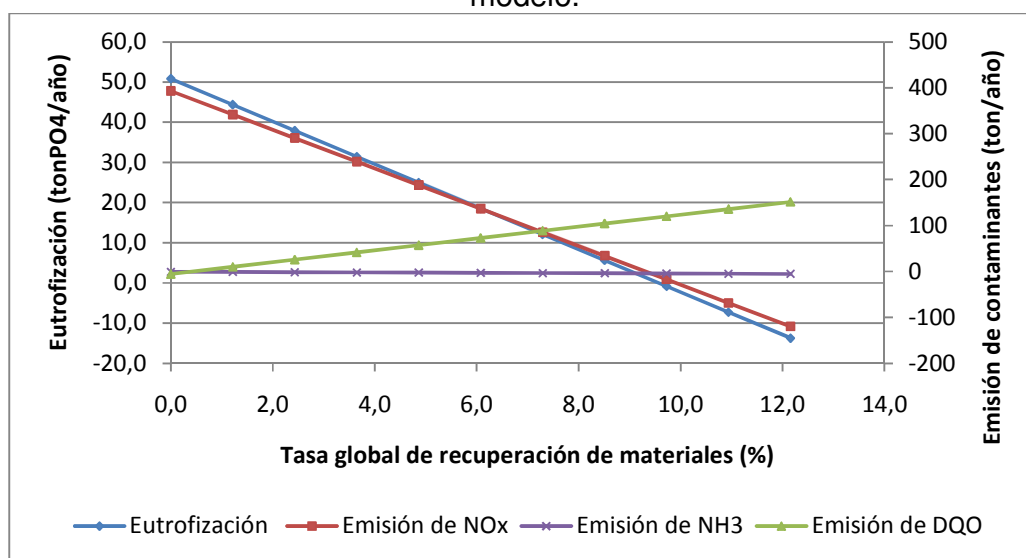


Gráfico 7.12. Eutrofización y emisión de NO_x, NH₃ y DQO en función de la tasa global de recuperación de materiales en el Sistema 2.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



Como se observa, para el indicador de Eutrofización existe un aumento neto de las emisiones al agua de DQO al aumentar la tasa de reciclaje. Sin embargo, debido al menor peso relativo de este parámetro, dado su bajo Poder de Eutrofización respecto al resto de los parámetros involucrados, dicho impacto presenta una disminución en el global.

Para comprender el comportamiento de este sistema y estudiar cómo los distintos aspectos afectan su desempeño, es necesario realizar un análisis para cada uno de los materiales recuperados por separado. Por esta razón, a continuación se detallan los resultados relacionados con el proceso de reciclaje y la sustitución de los materiales vírgenes para las máximas tasas

de separación en origen planteadas (S2_EP), y como cada uno de los materiales contribuye al desempeño total del sistema.

De acuerdo a las tasas de separación en origen propuestas, el papel y cartón son los principales materiales destinados a reciclaje, representando el 52 % del total, seguido por los metales ferrosos con un 25 %. Por lo tanto, los efectos debido al reciclaje de estos materiales influyen significativamente en el desempeño del sistema en su conjunto.

En el Gráfico 7.13 se muestra el ahorro en energía eléctrica y combustibles debidas al reciclaje y sustitución de materiales vírgenes para cada material recuperado.

Como se mencionó anteriormente, los ahorros producidos por reciclaje de papel y cartón, y metales ferrosos son muy importantes, dada la mayor cantidad de materiales recuperados, aunque también por un consumo intensivo de energéticos en la fabricación de materiales vírgenes.

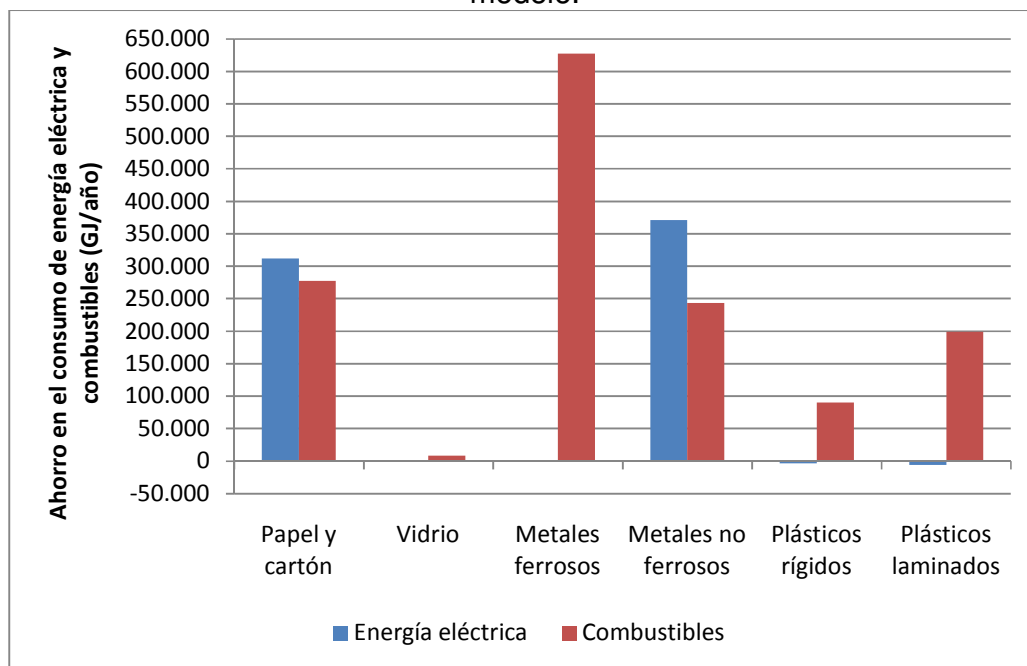
A su vez, más allá de contribuir con sólo el 6 % de los materiales recuperados, el reciclaje de metales no ferrosos causa un ahorro muy importante tanto en el consumo de energía eléctrica como de combustibles,

debido principalmente a los elevados consumos energéticos de extracción y producción de aluminio.

Para el caso de los plásticos, más allá del bajo peso relativo de estos materiales en el total desviado a reciclaje (14 %), debido a que el reciclaje presenta consumos específicos de energéticos considerablemente menores respecto a la fabricación de materiales vírgenes, los resultados obtenidos presentan indicadores para el consumo de combustibles incluso mayores a los resultantes para el papel y cartón.

Gráfico 7.13. Ahorro en el consumo de energía eléctrica y combustibles en el reciclaje para el escenario S2_EP.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



En los gráficos a continuación se muestran las emisiones evitadas debidas al reciclaje de cada uno de los materiales recuperados en el Escenario Principal. Cabe aclarar, que en estos gráficos están excluidas las emisiones producidas por consumo de energía y combustibles, o sea, son contabilizados sólo los ahorros de emisiones entre el propio proceso de reciclaje y la fabricación de los materiales vírgenes desplazados.

Para todos los materiales considerados, el reciclaje significa el ahorro de las emisiones de CO₂ fósil. La única excepción la representa el reciclaje de papel y cartón debido a que, como ya fue mencionado, se consideran nulas las emisiones de CO₂ resultantes del proceso de fabricación de papel y cartón virgen (ver 5.7 Reciclaje).

Respecto al resto de los parámetros evaluados, los resultados obtenidos reflejan un ahorro de las emisiones por reciclaje para todos los materiales, a excepción de las emisiones al agua de DQO que presenta el reciclaje de papel y cartón.

Entre los aspectos particulares, se puede destacar el ahorro de las emisiones de SO_x producidas por el reciclaje de metales no ferrosos, más allá de la relativamente baja cantidad de estos materiales recuperados.

Gráfico 7.14. Ahorro de emisiones de CO₂ fósil debido al reciclaje para el escenario S2_EP(se excluyen las emisiones por consumo de energía y combustibles).

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.

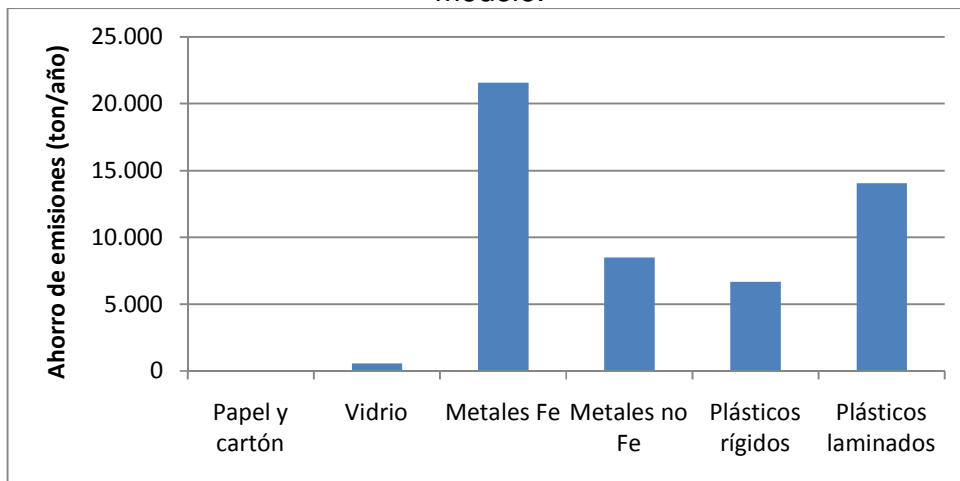
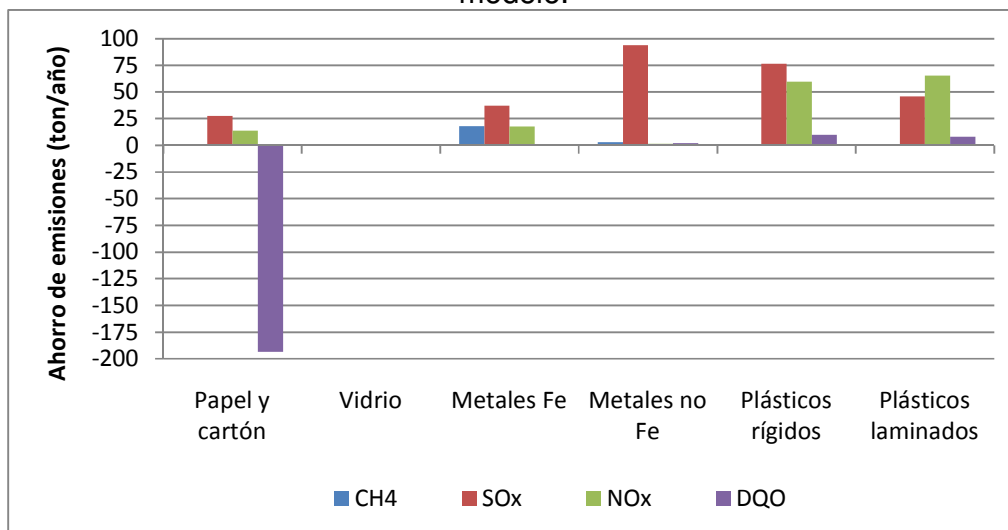


Gráfico 7.15. Ahorro de emisiones de CH₄, SO_x, NO_x y DQO debido al reciclaje para el escenario S2_EP (se excluyen las emisiones por consumo de energía y combustibles).

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



En cuanto al resto de los indicadores utilizados para la interpretación de los resultados, para el Escenario Principal, correspondiente a una tasa global de recuperación de materiales de **12,2 %**, se logra una reducción del volumen ocupado en el SDF mayor al 25 % respecto al sistema de incineración de la totalidad de los residuos, debido a una menor producción de cenizas.

Si bien al aumentar la tasa de separación en origen aumenta el consumo de combustible de transporte de los residuos, ya que se requiere incrementar los circuitos de recolección para abarcar los materiales clasificados; el consumo total de combustible disminuye producto de los importantes ahorros debido al reciclaje, hasta alcanzar un ahorro neto de **31.632 tep** para el Escenario Principal.

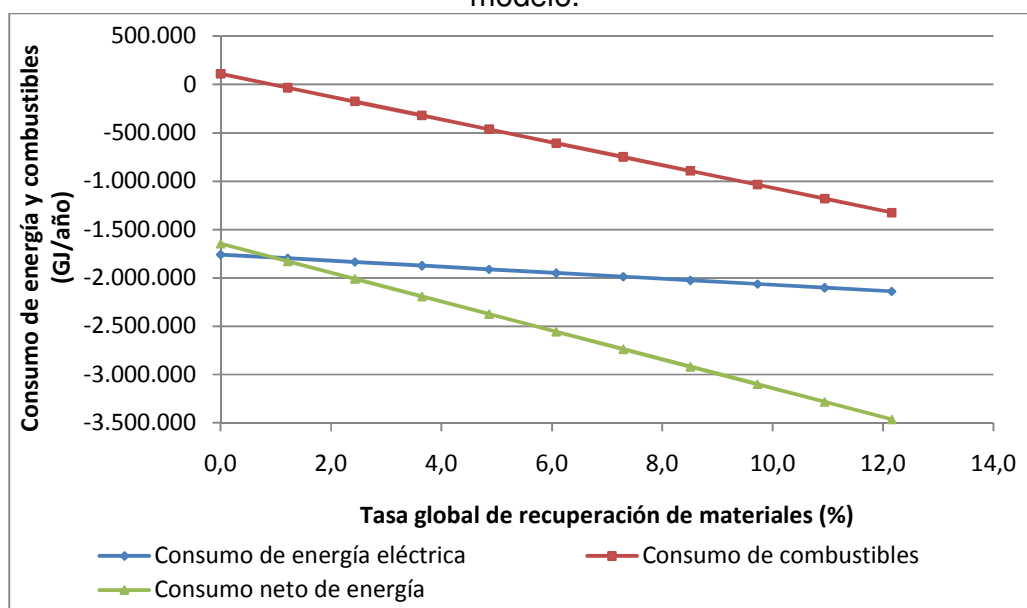
Por otro lado, el ahorro en el consumo de energía eléctrica para el Escenario Principal alcanza un valor de **595 GWh/año**, de los cuales 187 GWh/año están asociados al reciclaje de materiales, correspondiendo el resto a la incineración de la fracción mixta remanente. El ahorro total alcanzado equivale a una potencia de generación de 68 MW, lo que representa una mejora superior al 20 % en la potencia equivalente de generación respecto al sistema exclusivo de incineración (S1_EP).

En cuanto al balance neto de energía, los resultados arrojan un ahorro de **3.465 TJ/año**.

A continuación se muestra la evolución del consumo de energéticos y el balance global de energía al aumentar la tasa de recuperación global de materiales.

Gráfico 7.16. Consumo de energía eléctrica y combustibles en función de la tasa global de recuperación de materiales en el Sistema 2.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



Respecto a las dioxinas y furanos, el reciclaje y la sustitución de materiales vírgenes generan un ahorro de sus emisiones debido principalmente a la menor cantidad de residuos que son incinerados consecuencia del desvío de

residuos a reciclaje. Sin embargo, el peso relativo de esta disminución resulta insignificante frente a las emisiones derivadas de la incineración.

En cuanto a las pérdidas que ocurren en el reciclaje de materiales, éstas quedan definidas según las eficiencias de dichos procesos. Como ya fue mencionado, se asume que la totalidad de estas pérdidas se dan en forma de descartes y residuos sólidos, más allá de que parte de las mismas corresponden a emisiones al agua y al aire (ver 5.7 Reciclaje). Para el Escenario Principal (S2_EP) estas pérdidas alcanzan un total de **8.736 ton/año**, representando el 9,3 % del total de los materiales desviados a reciclaje.

Por último se analiza el desempeño del sistema ante el aumento de la tasa de separación en origen del papel y cartón hasta el 75 % y de plásticos hasta el 60 % (S2_E2). De esta manera, la tasa de recuperación global de materiales se incrementa hasta el **18,7 %**.

Para este escenario, los tres impactos evaluados disminuyen considerablemente en relación al Escenario Principal. Es así que el indicador de Calentamiento Global alcanza un valor de **-71,5 ktonCO₂eq/año**, el indicador de Acidificación un valor de **-2,58 ktonSO₂eq/año** y el indicador de Eutrofización un valor de **-73,5 tonPO₄eq/año**. Como puede observarse, se

obtienen valores negativos, significando la reducción neta de estos impactos dado por los procesos que el sistema desplaza.

Mientras que para el Calentamiento Global y Acidificación la reducción se debe a los efectos ya mencionados, el valor sorprendentemente elevado para la reducción observada en la Eutrofización se encuentra directamente asociada a las emisiones evitadas de fósforo al agua por el reciclaje de materiales plásticos.

Otro aspecto de gran importancia que surge de este escenario corresponde al ahorro en el consumo de energía eléctrica, el cual alcanza un valor de **550 GWh/año**, equivalentes a 63 MW de potencia de generación. Esto significa una disminución respecto al Escenario Principal y una desmejora desde el punto de vista de la energía eléctrica generada por el sistema. Esto se debe a que al aumentar la tasa de reciclaje de estos materiales, se pierde poder calorífico de la masa de residuos a incinerar y con ello una menor generación eléctrica.

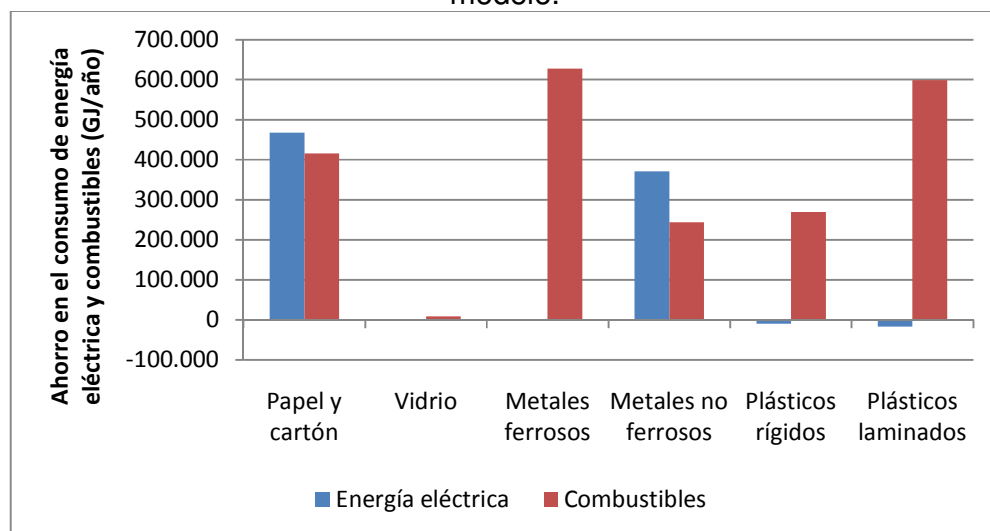
No obstante, si se analiza el balance neto de energía, se observa que el ahorro energético para este escenario alcanza los **4.014 TJ/año**, representando un aumento en el ahorro mayor al 15 % respecto al Escenario

Principal. Esto se debe a que, si bien disminuye la generación eléctrica en la incineración, el ahorro de la energía inherente de los materiales ante el reciclaje es aún mayor.

En el siguiente gráfico se muestra el ahorro en energía eléctrica y combustibles debidas al reciclaje y sustitución de materiales vírgenes para cada material recuperado correspondiente en este escenario.

Gráfico 7.17. Ahorro en el consumo de energía eléctrica y combustibles en el reciclaje para el escenario S2_E2.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



7.2.4 Sistema 3

A partir del Sistema 3 se posibilita la separación en origen de los materiales orgánicos para su tratamiento biológico. En un principio se estudia como

varía el desempeño del sistema aumentando progresivamente la tasa de separación (S3_E1) hasta alcanzar el 30 % de los materiales generados, correspondiente al Escenario Principal (S3_EP), en el cual se destina la totalidad del biogás a la generación eléctrica y el compost como bioabono. Luego se evalúa el desvío del compost hacia el SDF como material de relleno (S3_E2); y por último, el aumento de la tasa de separación en origen de la fracción húmeda hasta alcanzar el 50 % (S3_E3). En todos los escenarios planteados se supone el envío de la cantidad necesaria de biogás hacia la incineración como combustible auxiliar.

El Gráfico 7.18 muestra la evolución del indicador de Calentamiento Global al aumentar la tasa de recuperación de materiales orgánicos, el cual disminuye debido a la reducción en las emisiones de CO₂ fósil producto del consumo de gas natural desplazado en la producción de fertilizantes sintéticos que son sustituidos por bioabono. Además, se registra una considerable disminución en la emisión de N₂O también producto de la sustitución de fertilizantes sintéticos, aunque siendo aún muy menor en comparación con los otros contaminantes.

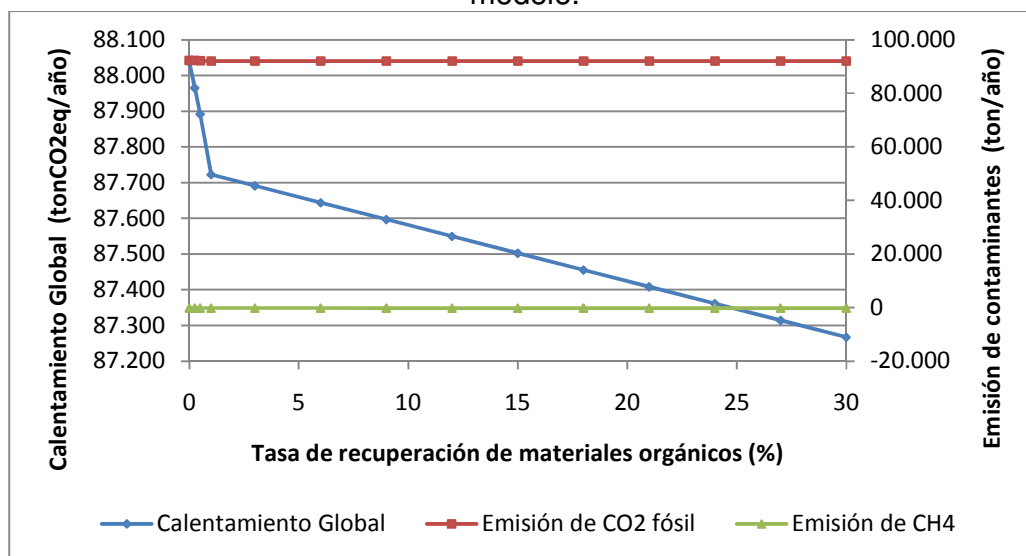
Un aspecto a resaltar es el cambio de pendiente observado en la tendencia del indicador, el cual presenta una pendiente mayor a bajas tasas de

recuperación de materiales y a partir de una tasa de aproximadamente 0,55 % la misma disminuye. Este hecho ocurre debido a que el modelo asume que mientras el biogás producido en el tratamiento biológico no sea suficiente para abastecer el proceso de incineración en sus requerimientos de combustible auxiliar, este déficit es suplido mediante gas natural de la red. Por esta razón, a bajas tasas de recuperación de materiales no solo existe una reducción de las emisiones debido a la sustitución de fertilizantes, sino también una reducción en el consumo directo de un combustible fósil.

Cabe aclarar que este cambio de pendiente también se da para la emisión de contaminantes, más allá de que en el gráfico no se pueda apreciar por un problema de escalas.

Gráfico 7.18. Calentamiento Global y emisión de CO₂ fósil, CH₄ y N₂O en función de la tasa de recuperación de materiales orgánicos en el Sistema 3.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



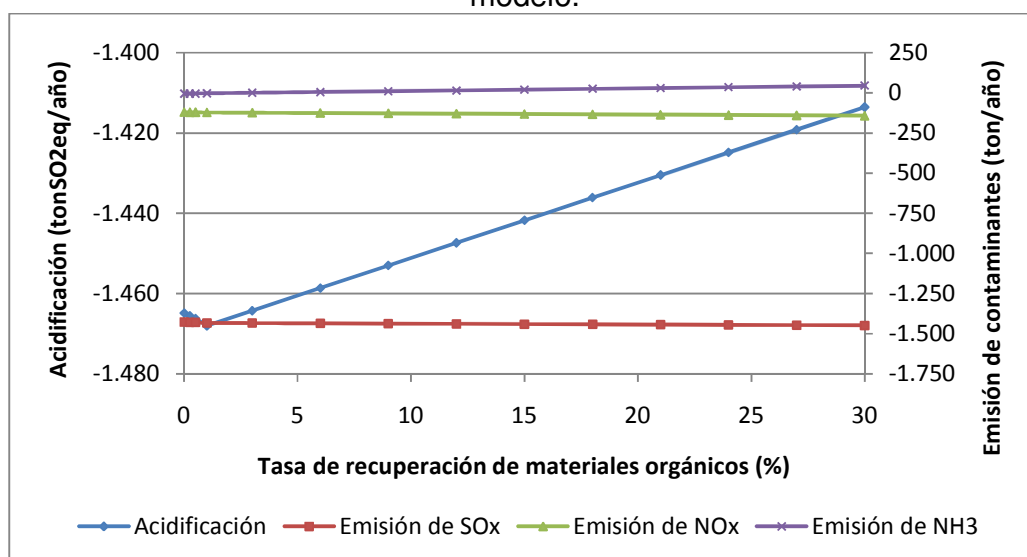
Por su parte, el indicador de Acidificación muestra un incremento al aumentar la tasa de recuperación de materiales dado que, si bien por un lado las emisiones de de SO_x y NO_x disminuyen a causa del ahorro en el consumo de gas natural, por otro se observa un aumento de las emisiones de NH₃ proveniente de la etapa de compostaje del tratamiento biológico, el cual posee un peso relativo mayor.

Se observa aquí también el efecto de la reducción en el uso de gas natural como combustible auxiliar en el proceso de incineración, ya que a bajas tasas de recuperación de materiales (menores a 0,55 %) el indicador de

Acidificación disminuye, mientras que una vez que el gas natural es sustituido completamente por el biogás generado en el tratamiento biológico, el indicador comienza a aumentar por las razones antes mencionadas.

Gráfico 7.19. Acidificación y emisión de SO_x, NO_x y NH₃ en función de la tasa de recuperación de materiales orgánicos en el Sistema 3.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.

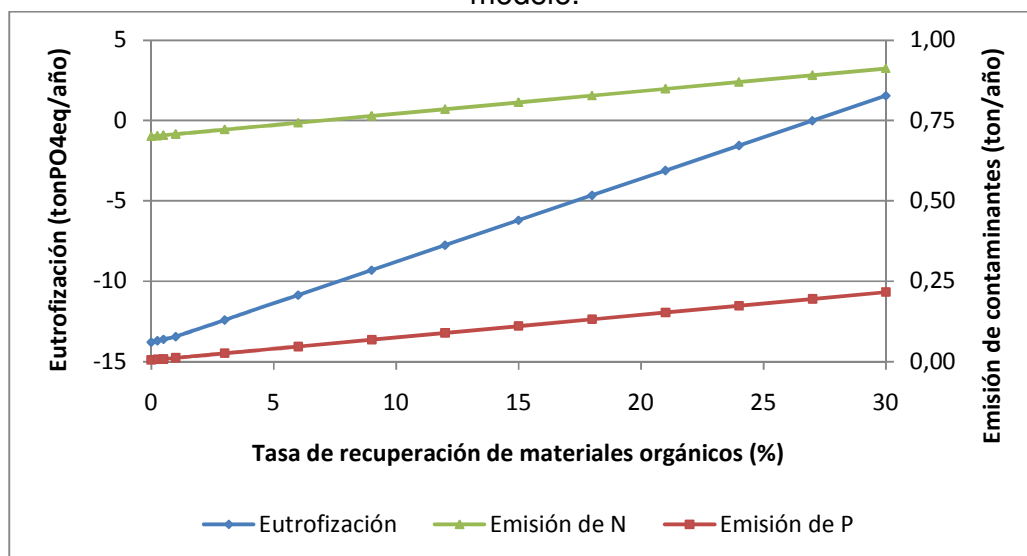


Por otro lado, el aumento ya mencionado de las emisiones de NH₃ durante el tratamiento biológico provoca un aumento en el indicador de Eutrofización, el cual también se ve acompañado por un aumento en las emisiones al agua de DQO, nitrógeno y fósforo, aunque éstas se dan en un nivel considerablemente menor.

Cabe mencionar que para este indicador también se produce un cambio de pendiente al variar la tasa de separación de la fracción húmeda, aunque en este caso el efecto es muy menor debido a que sólo se ve afectada la emisión de NH_3 y en una proporción relativamente baja, debido a que las emisiones asociadas a este contaminante producto del consumo de gas natural son insignificantes frente a las generadas durante el compostaje.

Gráfico 7.20. Eutrofización y emisión de nitrógeno y fósforo en función de la tasa de recuperación de materiales orgánicos en el Sistema 3.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



Por otro lado, de acuerdo a la tasa de separación en origen de la fracción húmeda, para el Escenario Principal se alcanza una tasa global de recuperación de materiales del **18,2 %**. A su vez, el volumen ocupado en el SDF es de **140.032 m³/año**, presentando relativamente poca diferencia con

el escenario en el cual esta fracción es incinerada, lo cual se debe al bajo contenido de cenizas en los materiales orgánicos.

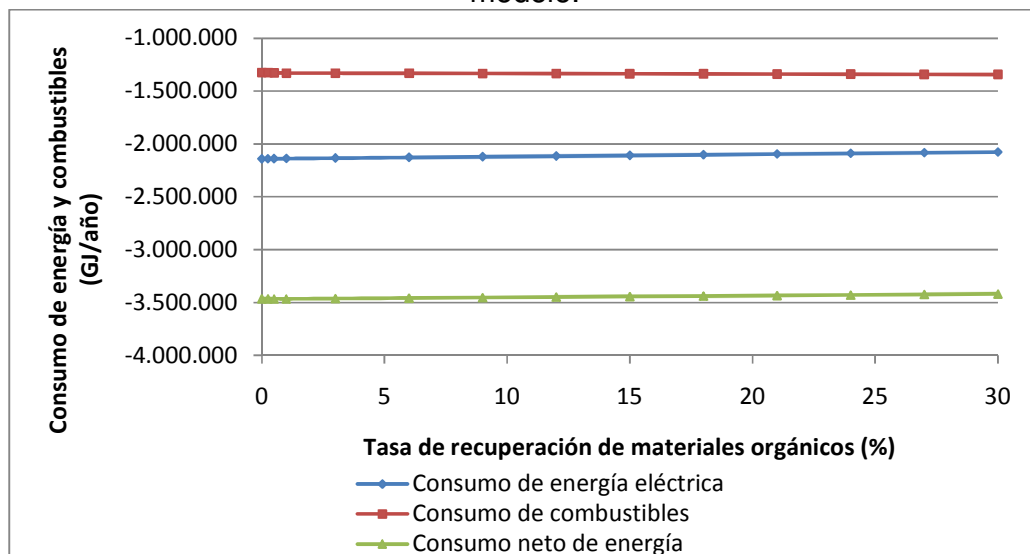
El resto de los indicadores utilizados para la interpretación de los resultados indican que al igual que para el Sistema 2, el consumo de combustibles en la recolección y transporte aumenta al aumentar la tasa de separación en origen debido a la necesidad de abarcar un mayor recorrido en los circuitos. Es así que el consumo de combustible en el transporte alcanza los **2.793 tep/año**, el cual continúa siendo muy menor frente al ahorro producido por la recuperación de materiales.

En el Gráfico 7.21 se muestra la tendencia en el consumo de energía eléctrica y combustibles, expresado en unidades de energía para su uniformización. En éste se observa que la generación de energía eléctrica disminuye levemente, debido básicamente a que el proceso de mineralización que ocurre en el tratamiento biológico no se da en su totalidad, es decir, el compost producto del tratamiento contiene energía que no es posible obtener como tal, lo cual ocurre en su totalidad durante la incineración.

Además, la utilización de parte del biogás como combustible auxiliar en la incineración no se considera dentro del potencial de generación de energía, ya que se entiende que dicho combustible tiene la finalidad de calentar el hogar de la incineración y no la propia generación. De esta manera, parte de la energía generada no está siendo considerada a través del modelo planteado.

Gráfico 7.21. Consumo de energía eléctrica y combustibles en función de la tasa de recuperación de materiales orgánicos en el Sistema 3.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



De igual forma que para el Sistema 2, la reducción en las emisiones de dioxinas y furanos resulta insignificante en relación a las emisiones provenientes de la incineración.

Por otro lado, el escenario de desvío del compost producido hacia el SDF para su utilización como material de relleno (S3_E2), en el cual se reduce la recuperación global de materiales al **12,2 %**., no presenta grandes diferencias en comparación con el Escenario Principal.

Dado que se asume que las emisiones de biogás producido por la descomposición del compost en el SDF son despreciables, el aumento de las emisiones corresponde únicamente a las emisiones no evitadas por la sustitución de fertilizantes sintéticos por bioabono. De esta manera, se observa un incremento respecto al Escenario Principal inferior al 2 % para el indicador de Calentamiento Global y del 1 % para el indicador de Acidificación.

Sin embargo, el desvío de compost hacia el SDF ocasiona un aumento en la generación de lixiviados y de las consecuentes emisiones al agua, con lo cual se observa un aumento en el indicador de Eutrofización del 37 % respecto al Escenario Principal, alcanzando un valor de **2,1 tonPO₄eq/año**.

Por último, la principal variación registrada en los resultados para el escenario de aumento de la tasa de separación en origen de materiales orgánicos a 50 % (S3_E3) ocurre en el indicador de Eutrofización. Éste

presenta un aumento en más del 600 % respecto al Escenario Principal, debido al importante aumento de las emisiones de NH_3 y lixiviados producidos durante el compostaje.

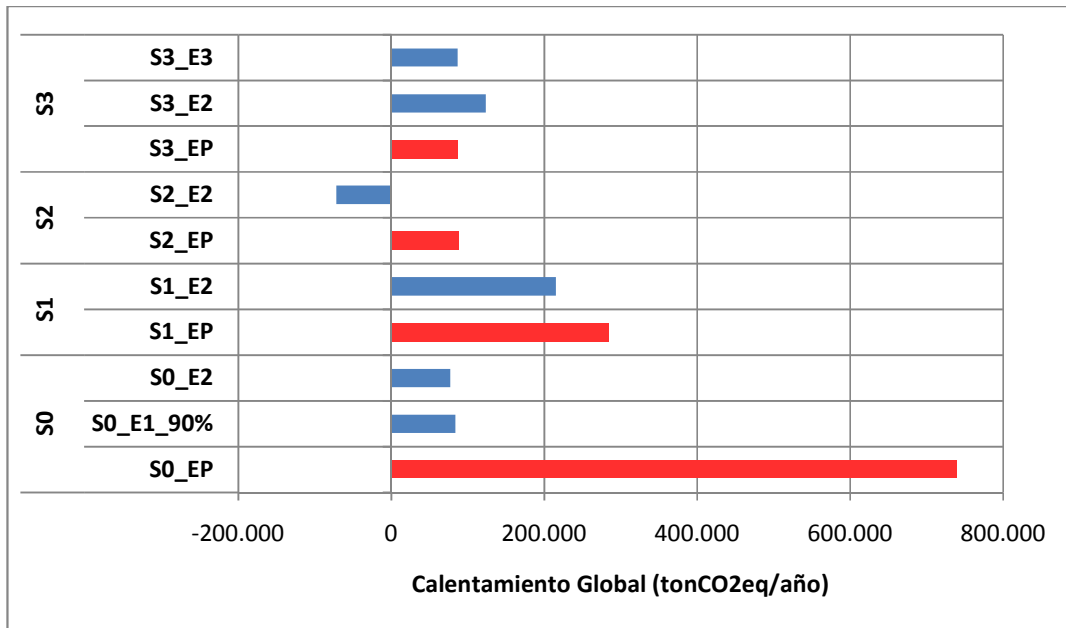
7.2.5 Comparación entre sistemas

A continuación se presenta el análisis comparativo de los resultados entre los distintos sistemas y escenarios en base a las observaciones realizadas en las secciones precedentes.

Iniciando el análisis comparando el comportamiento del indicador del impacto Calentamiento Global para los distintos sistemas, en el Gráfico 7.22 se muestran los resultados obtenidos para todos los escenarios planteados.

Gráfico 7.22. Calentamiento Global de los distintos sistemas y escenarios.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



Como se puede apreciar, el indicador de Calentamiento Global asociado al Sistema 0, correspondiente a la disposición de la totalidad de los residuos sin recuperación de biogás (S0_EP), excede largamente al resto de los escenarios; mientras que los escenarios de este sistema en los cuales se incorpora algún tipo de recolección de biogás, los niveles de dicho indicador se reducen significativamente.

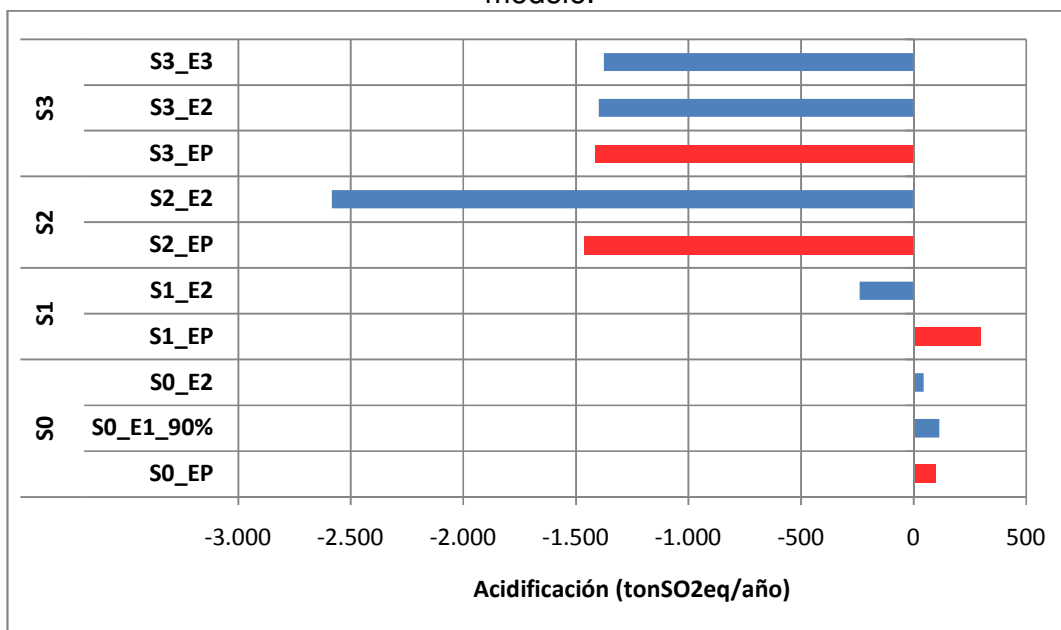
Mediante la incorporación del proceso de la incineración como tratamiento alternativo de la fracción mixta se reduce el nivel del Calentamiento Global en un 61 % respecto al sistema de disposición final sin recolección de

biogás. Sin embargo, se observa que para los escenarios de incineración como único proceso (S1_EP), el indicador de Calentamiento Global presenta valores relativamente elevados debido a la quema masiva de plásticos. Ante la recuperación de materiales, especialmente plásticos, este indicador disminuye apreciablemente.

Respecto al impacto de Acidificación, en el Gráfico 6.23 se muestran los resultados del indicador para todos los escenarios propuestos.

Gráfico 7.23. Acidificación de los distintos sistemas y escenarios.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



La principal fuente de emisiones causantes de este impacto se relaciona con la incineración (S1_EP), siendo incluso superior a las provenientes de la disposición de la fracción mixta en SDF (S0_EP).

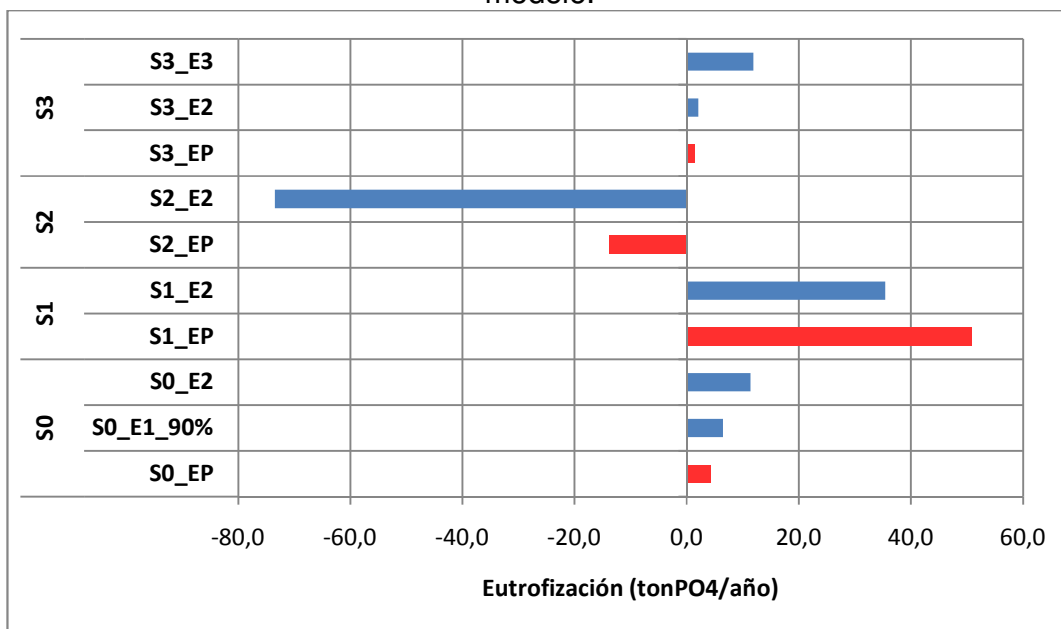
Por su parte, la principal causa de la reducción de los niveles del indicador de Acidificación en los sistemas de recuperación de materiales (Sistema 2) corresponde a la sustitución en el uso de combustibles en la fabricación de materiales vírgenes y a la importante cantidad de emisiones evitadas de los principales gases causantes de Acidificación.

En este sentido, se observa que la incorporación del proceso de tratamiento biológico de la fracción húmeda (Sistema 3) no afecta significativamente el indicador de Acidificación, debido al bajo factor de emisión de gases ácidos en la incineración de materiales orgánicos.

En cuanto al indicador del impacto de Eutrofización, cuyos resultados para los escenarios planteados se muestran en el Gráfico 7.24, éste presenta comportamientos muy dispares para cada sistema.

Gráfico 7.24. Eutrofización de los distintos sistemas y escenarios.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



En primer lugar, las principales emisiones causantes de la Eutrofización corresponden a la emisión al aire de NO_x proveniente del proceso de incineración (Sistema 1). Si bien tanto en la disposición final (Sistema 0) como en el tratamiento biológico (Sistema 3) se dan emisiones al agua de contaminantes causantes de Eutrofización, éstas se dan en un nivel muy inferior.

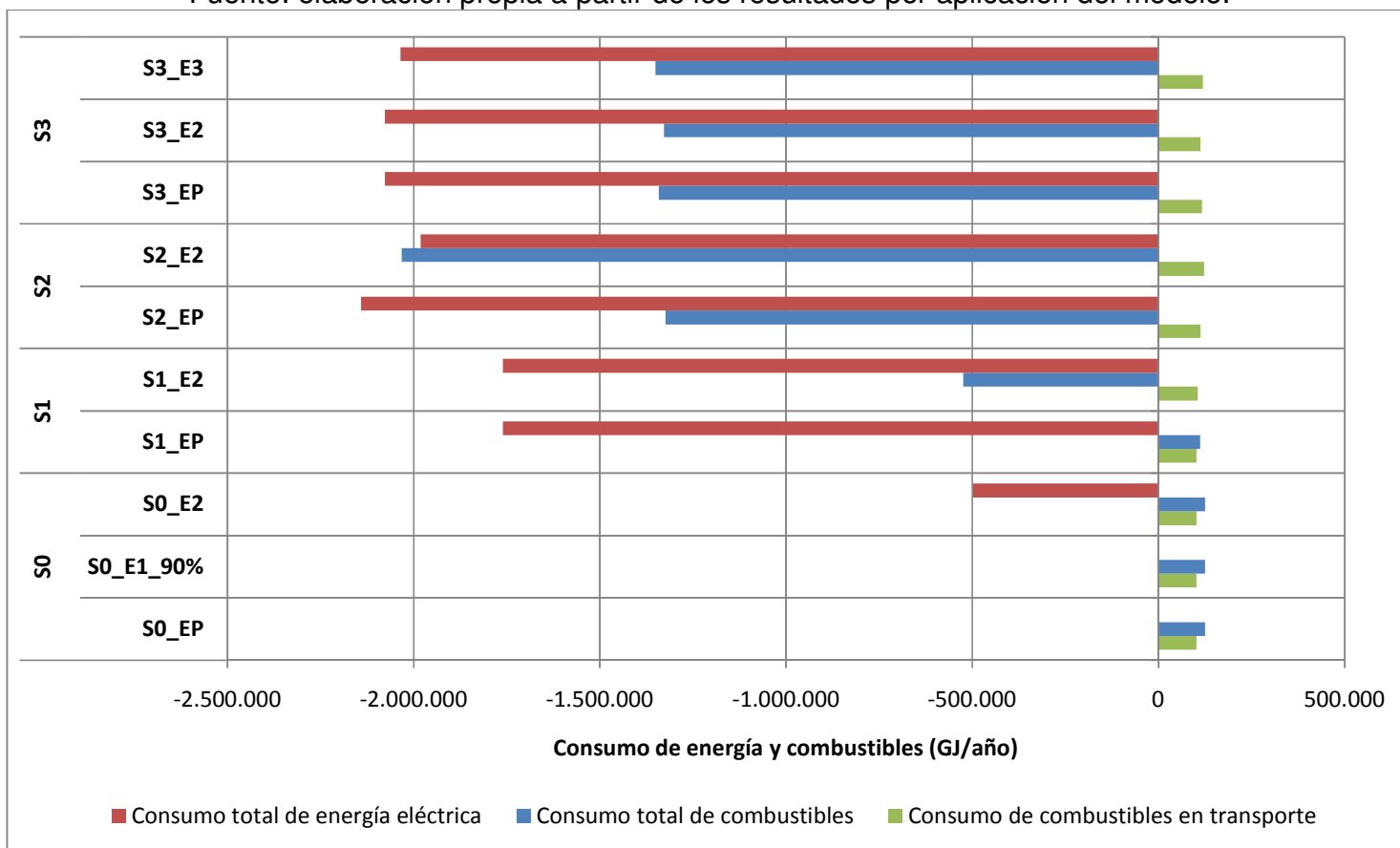
Por otro lado, las emisiones evitadas por sustitución en el uso de combustibles por la recuperación de materiales y sustitución de materiales vírgenes (Sistema 2) causan una reducción en este indicador. De esta manera, se observa que la incorporación del reciclaje para las tasas de

recuperación propuestas (S2_EP) disminuye el indicador de Eutrofización hasta alcanzar valores negativos, significando una reducción del impacto producido por los sistemas sustituidos por el reciclaje de materiales.

La inclusión del tratamiento biológico de la fracción húmeda (Sistema 3), no sólo aumenta la emisión al agua de contaminantes en los lixiviados del compostaje como ya fue mencionado, sino que este proceso también produce emisiones al aire de NH_3 con un efecto considerablemente mayor sobre el indicador de Eutrofización.

Gráfico 7.25. Consumo de energía eléctrica y combustibles de los distintos sistemas y escenarios.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



En relación a los aspectos energéticos, en el Gráfico 7.25 se muestra el consumo total de energía eléctrica y combustible de los sistemas evaluados, incluyendo además el consumo de combustible específico para la recolección y transporte de residuos.

Como puede apreciarse, si bien aumenta levemente al incrementarse los circuitos de recolección producto de la clasificación en origen de materiales, el consumo de combustible debido al transporte presenta niveles muy menores respecto a los ahorros totales de combustibles en los escenarios de reciclaje. Es así que para las tasa de recuperación de materiales propuestas (S2_EP) se alcanza un ahorro total de combustibles de **31.632 tep/año**, mientras que el consumo de combustibles es de tan solo **2.703 tep/año**.

Por su parte, el aumento observado en el ahorro total de combustibles producto de la utilización de compost como bioabono en los escenarios que incorporan el proceso de tratamiento biológico, alcanza un valor de 1,4 y 2,0 % para tasas de separación en origen de materiales orgánicos del 30 (S3_EP) y 50 % (S3_E3) respectivamente, respecto al escenario sin recuperación de la fracción húmeda (S2_EP).

En cuanto a la energía eléctrica, se observa que la incineración de la totalidad de la fracción mixta (S1_EP) representa un ahorro neto, o generación, de **489 GWh/año**. Si se compara este valor con el escenario de reciclaje de materiales según las tasas de recuperación planteadas (S2_EP), donde el ahorro neto producido es de **595 GWh/año**, de los cuales 408 GWh/año (68,7 %) corresponde a la incineración y 187 MWh/año (31,5 %) al reciclaje de materiales. Se concluye entonces que el reciclaje de materiales resulta en un mayor ahorro de energía eléctrica en comparación con la incineración de estos materiales. Como se detalla más adelante, este hecho se amplifica aún más si se considera el balance neto de energía incluyendo el ahorro en el consumo de combustibles.

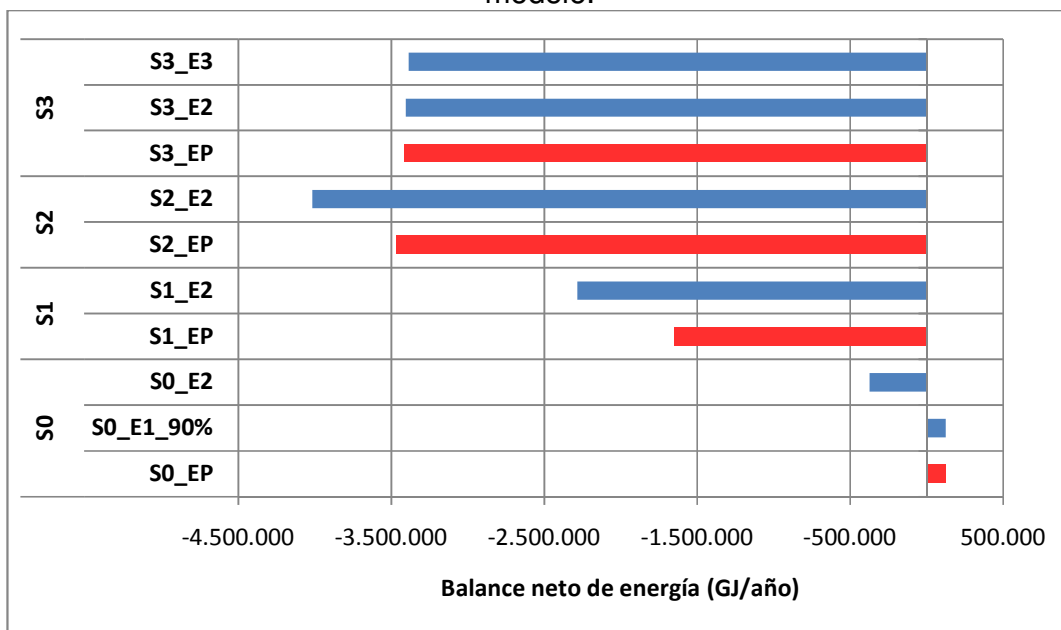
Sin embargo, al aumentar la tasa de clasificación de papel y cartón, y materiales plásticos (S2_E2), el ahorro de energía eléctrica total se ve disminuido, debido a que, si bien por un lado aumenta el ahorro por reciclaje, la generación por incineración se ve fuertemente disminuida por el retiro de los materiales de mayor poder calorífico de la corriente de residuos a incinerar.

Por otro lado, como se puede apreciar, la incorporación del tratamiento biológico de la fracción húmeda (S3_EP), no significa grandes cambios en lo que se refiere al ahorro de energía eléctrica.

En términos de balance neto de energía, a excepción de los escenarios de disposición final de residuos si recuperación energética de biogás (S0_EP y S0_E1), el resto de los escenarios propuestos reflejan importantes ahorros de energía.

Gráfico 7.26. Balance neto de energía de los distintos sistemas y escenarios.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.

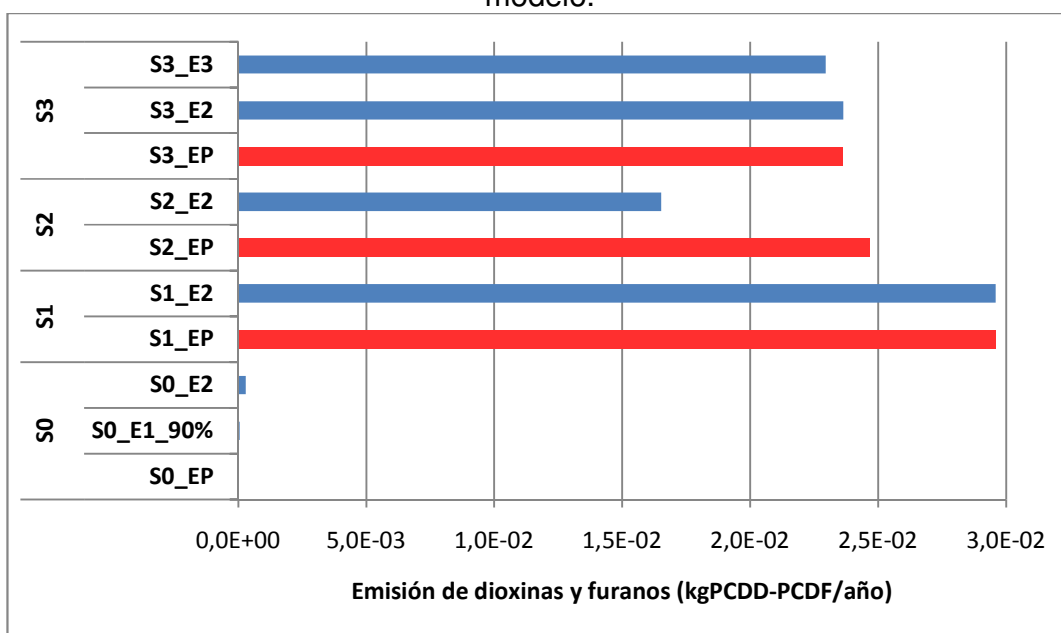


En este sentido, es posible notar que los escenarios de reciclaje de materiales (Sistema 2) incrementan entre 110 y 144 % el ahorro neto de energía respecto al escenario de incineración como único proceso; mientras que la inclusión del tratamiento biológico (Sistema 3) contribuye con un ahorro no mayor al 10 % en relación al escenario de incineración masiva de residuos, pudiendo incluso reducir el ahorro global si el compost producido no es utilizado como bioabono (S3_E3).

Por último, se comparan los resultados obtenidos para la emisión de dioxinas y furanos, mostrados en el Gráfico 7.27. Como se aprecia, la principal fuente de emisión de dioxinas y furanos corresponde al proceso de incineración (Sistema 1), mientras que al aumentar la tasa de recuperación de materiales (S2_EP y S2_E2) los niveles de emisión disminuyen a causa de la reducción de la cantidad de residuos incinerados. Además, es posible decir que la incorporación del proceso de tratamiento biológico no significa grandes cambios en los niveles de emisión, debido al relativamente bajo factor de emisión de estos contaminantes que poseen los materiales orgánicos en el proceso de incineración.

Gráfico 7.27. Emisión de dioxinas y furanos de los distintos sistemas y escenarios.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



7.2.6 Variación de la composición

En la presente sección serán analizados los efectos causados en el desempeño de los sistemas modelados ante el cambio de la composición de los residuos generados indicada en la Tabla 5.4. Como ya ha sido mencionado, este cambio de la composición significa un aumento en la generación de residuos de papel y cartón, vidrio y plásticos, mientras que disminuye la generación de residuos de metales ferrosos y materiales orgánicos, manteniendo la misma cantidad total de residuos generados.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la categoría de impacto que se ve más afectada frente al cambio propuesto en la composición de los residuos es el Calentamiento Global, presentando diversos efectos en cada uno de los sistemas evaluados. Los datos de todos los sistemas propuestos para ambas composiciones se presentan en el Gráfico 7.29.

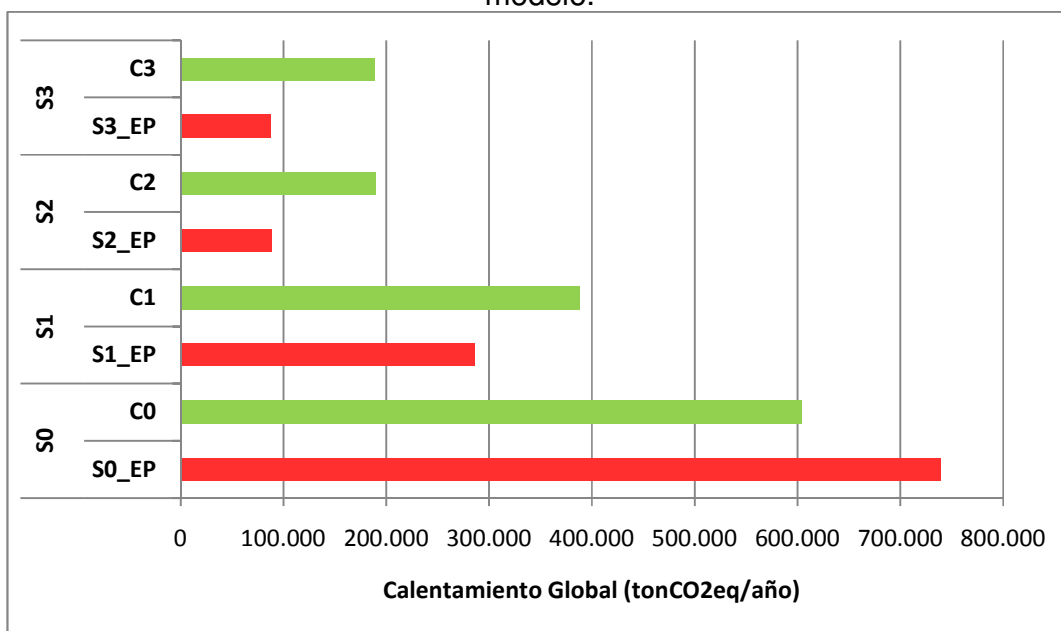
En primer lugar, el sistema de disposición final de la fracción mixta (S0_EP/C0) presenta una disminución del 18 % en el indicador de Calentamiento Global correspondiente a la menor cantidad de materiales orgánicos presentes en los residuos que causan una menor generación de biogás.

Por el contrario, en los escenarios que incorporan el proceso de incineración (S1_EP/C1) este impacto presenta un aumento debido a la mayor cantidad de materiales plásticos que son incinerados. En este sentido, la recuperación de materiales y su reciclaje para sustitución de los materiales vírgenes (S2_EP/C2), produce un aumento debido principalmente a la reducción en el reciclaje de metales ferrosos, el cual posee elevados niveles de emisiones evitadas.

En los escenarios que incluyen tratamiento biológico de la fracción húmeda (S3_EP/C3), el indicador de Calentamiento Global muestra un aumento del 72 % ante el cambio de composición adoptado, dado que la cantidad de bioabono producido es menor, resultando en una menor sustitución de fertilizantes sintéticos.

Gráfico 7.28. Calentamiento Global para los distintos escenarios con variación de la composición.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



Para los impactos de Acidificación y Eutrofización, la variación de la composición no resulta en ningún cambio de relativa significancia en ninguno de los escenarios planteados.

En cuanto a los aspectos energéticos que se ven afectados por el cambio en la composición de los residuos, en el Gráfico 7.29 se muestran los resultados obtenidos de los distintos sistemas evaluados.

En primer lugar, es posible decir que el consumo de combustible para la recolección y transporte no manifiesta cambios de importancia en ninguno de los escenarios planteados. Esto se debe a que, si bien varían las proporciones de que cada material recolectado en los distintos circuitos, las tasas globales de recuperación de materiales no se modifican apreciablemente.

Los principales cambios se observan debido al aumento del contenido en los residuos de papel y cartón, y plásticos, los cuales provocan el aumento del 15 % en la generación eléctrica en la incineración a causa de su elevado poder calorífico (S1_EP/C1). Este hecho provoca que el balance neto de energía sea favorable a los sistemas de cambio de la composición.

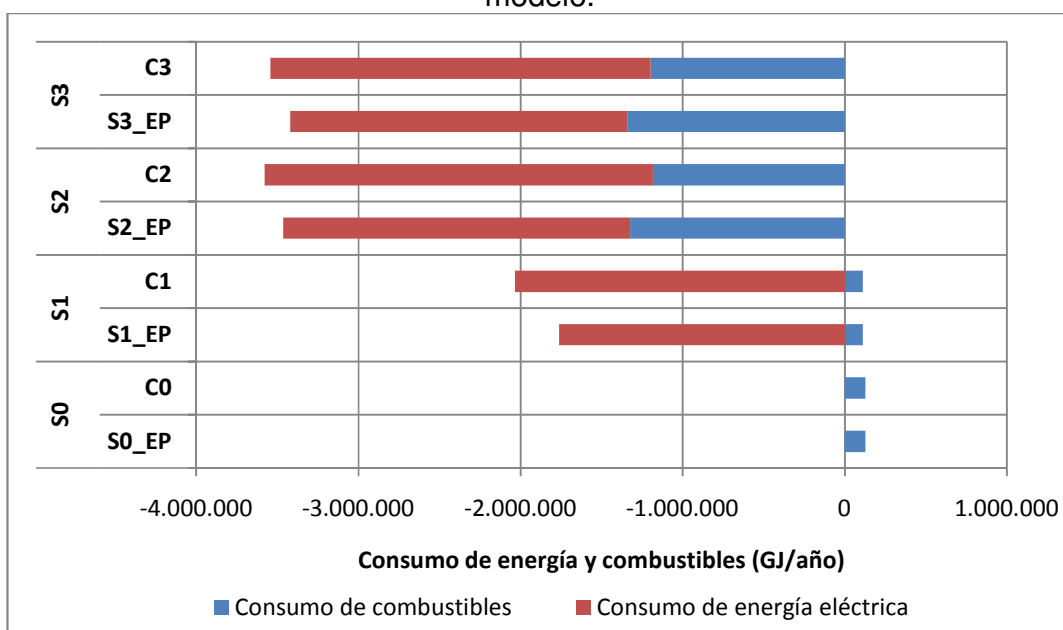
En los escenarios de reciclaje de materiales (S2_EP/C2), el menor nivel de recuperación de metales ferrosos produce una disminución en el consumo de combustibles, ya que este proceso representa uno de los principales

causantes de dicho aspecto. Por otro lado, el aumento del reciclaje de papel y cartón promueve un mayor ahorro en el consumo de energía eléctrica.

En otro sentido, la disminución en la producción de bioabono en los sistemas con tratamiento biológico (S3_EP/C3), que ya ha sido comentada, ocasiona a su vez un menor ahorro en el consumo de combustibles.

Gráfico 7.29. Consumo total de energía eléctrica y combustibles para los distintos escenarios con variación de la composición.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados por aplicación del modelo.



Por último, a partir de los resultados obtenidos es posible decir que el cambio de la composición de residuos produce un aumento en las emisiones de dioxinas y furanos, debido principalmente al aumento de la incineración de materiales plásticos, los cuales son los mayores precursores de estos contaminantes.

8. CONCLUSIONES E IDENTIFICACIÓN DE OPORTUNIDADES

8.1 Introducción

En la sección a continuación se detallan las conclusiones que fueron alcanzadas a partir de los resultados obtenidos en el ACV de los sistemas planteados. En ésta se indican los aspectos identificados de mayor relevancia en la gestión de RSU, de manera de poder establecer las oportunidades de mejora que permitan optimizar su desempeño ambiental.

A su vez, se realiza una revisión crítica del modelo desarrollado, con el fin de evaluar la coherencia de la metodología utilizada, determinar las limitaciones encontradas, las incertidumbres que afectan los resultados y los estudios posteriores que se requieren.

8.2 Conclusiones

En primer lugar, se destaca el modelo de ACV desarrollado como una herramienta sencilla, flexible y versátil en la simulación de los numerosas posibles variantes de sistemas de gestión de RSU y sus distintos escenarios; incluso permitiendo la evaluación de otros diversos escenarios que no fueron incluidos en el presente estudio.

Esta herramienta permite obtener un ICV detallado del sistema en su globalidad y de las operaciones unitarias que lo componen, constituyendo una metodología exhaustiva en la predicción de cargas ambientales generadas. De esta manera, el modelo facilita la interpretación de los resultados y la identificación de los aspectos de mayor significancia en cada uno de los escenarios planteados, así como la comparación entre distintas alternativas y la optimización del flujo de materiales desviado a cada una de las operaciones.

Cabe mencionar que el modelo desarrollado puede ser ampliado en lo que se refiere a los aspectos ambientales analizados, tanto en la lista de contaminantes emitidos como en las categorías de impacto evaluadas.

A su vez, el modelo proporciona una base para la incorporación de los aspectos económicos mediante el análisis de los costos totales de un sistema de gestión de RSU. Esto se debe a que la metodología de ACV simplifica la identificación, no sólo de los costos directos asociados a la gestión, sino también de aquellos costos indirectos producto de las actividades secundarias relacionadas, como la recuperación de materiales y energía.

Sin embargo, como se indica más adelante, el éxito en la utilización de esta herramienta para la predicción de las cargas ambientales de un sistema modelado, radica en la adopción de la información ajustada respecto al desempeño de los procesos unitarios y a la realidad que se pretende modelar. Por esta razón, los datos que son ingresados al modelo deben ser sometidos a revisión y validación de forma de minimizar las incertidumbres en relación a los resultados obtenidos.

De acuerdo a las observaciones realizadas en el diagnóstico, se puede concluir que la gestión actual de RSU en el AMM representa un sistema en el cual, si bien se han dedicado varios esfuerzos para mejorar su desempeño, aún quedan muchos problemas por resolver desde el punto de vista de la revalorización de los residuos y el control de los aspectos ambientales asociados.

Los resultados correspondientes al escenario actual reflejan que la revalorización de los residuos, aún incluyendo la recolección del biogás producido y su utilización en la generación de energía eléctrica, es un sistema que continúa siendo ineficiente. Esto se debe a que el biogás es sólo una pequeña fracción del potencial energético que poseen los residuos, además de ser la recolección del biogás una operación que por sí misma no

puede ser óptima debido a las considerables pérdidas de biogás desde el SDF que inevitablemente se producen.

A su vez, la disposición final de residuos constituye una fuente importante de impactos ambientales potenciales, siendo el Calentamiento Global el más evidente de éstos, producto de las emisiones producidas de metano.

No obstante, cabe recordar que para la aplicación del modelo, fue asumido que los lixiviados producidos en el SDF son adecuadamente recolectados y tratados de forma de cumplir con los parámetros de vertido de efluentes según lo establecido por la normativa vigente. En caso de que esto no se cumpliera, los impactos derivados afectarían directamente al entorno de manera significativa.

Por estas razones, se reconoce la necesidad de encontrar nuevas alternativas al manejo de los residuos.

La primera opción que surge, y que ya ha sido objeto de evaluación por parte de las autoridades nacionales, consiste en la incorporación de la incineración como proceso de tratamiento de los residuos, destinando únicamente las cenizas y escorias a disposición final. De esta manera es posible alcanzar una reducción de hasta el 80 % del volumen ocupado en los SDF, más allá

de que se requiere un mayor control de los potenciales impactos ambientales por tratarse de residuos de mayor peligrosidad.

Al mismo tiempo, la recuperación energética contenida en los residuos a través de la incineración representa un interesante mecanismo de ampliación y diversificación de la matriz energética nacional. De acuerdo a los resultados obtenidos, el potencial de generación eléctrica por incineración masiva de los residuos alcanza niveles muy importantes, pudiendo lograr una generación neta equivalente al 5 % del consumo nacional.

Sin embargo, el proceso de incineración presenta niveles significativos de varios de los aspectos e impactos ambientales analizados, como son la Acidificación, Eutrofización, y la emisión de dioxinas y furanos. Asimismo, este proceso puede ser considerado una fuente puntual de impactos potenciales concentrados a nivel local, más allá de aquellos que también presentan efectos globales. Por lo tanto, la implementación del proceso de incineración de residuos requiere un estricto control y mitigación de sus emisiones.

Como acción complementaria a la incineración de residuos, la aplicación del modelo ha demostrado que mediante la recuperación y reciclaje de

materiales es posible lograr importantes beneficios ambientales y energéticos. Es así, que mediante la combinación del reciclaje de los materiales que conforman la fracción seca y de la incineración masiva del resto de la fracción mixta no clasificada, se logran los niveles máximos de revalorización energética de los residuos.

Respecto a los beneficios ambientales obtenidos, un caso especial a destacar lo constituye la recuperación de metales, ferrosos y no ferrosos, que si bien se presentan en una proporción menor en la corriente de residuos generados, su reciclaje proporciona ahorros muy significativos en el consumo de energía y combustibles como consecuencia de la sustitución de materiales vírgenes.

A su vez, si se consideran los relativamente altos precios que poseen estos materiales en el mercado de los reciclables, se agrega un factor económico atractivo que opera a favor de su clasificación. Cabe mencionar que, a diferencia de otros materiales, el reciclaje de metales logra materiales con prácticamente la misma funcionalidad que mediante la fabricación a partir de materia prima virgen.

Además, dado que los metales no representan ningún aporte energético en la incineración, su clasificación y recuperación reduce los requerimientos de capacidad de la planta incineradora significando un importante beneficio para dicho proceso.

Por otro lado, el reciclaje de plásticos, papel y cartón también provoca importantes beneficios ambientales y ahorros energéticos. Sin embargo, debido a que estos materiales son los que presentan mayores poderes caloríficos, a niveles elevados de separación de estos materiales de la fracción mixta, la generación eléctrica a partir de la incineración se ve fuertemente disminuida, pudiendo incluso revertir los beneficios alcanzados y representar un escenario con menor eficiencia desde el punto de vista energético, si no se considera el ahorro en el consumo de combustibles. Sin embargo, este hecho se verifica para tasas de clasificación muy elevadas, las que en un principio se pueden suponer difíciles de alcanzar. A su vez, si se analiza el balance neto de energía, contemplando tanto el consumo de energía eléctrica como de combustibles, en cualquier escenario continúa siendo favorable la recuperación y reciclaje de estos materiales.

Si bien los resultados obtenidos para los sistemas de recuperación de materiales presentan beneficios muy importantes, éstos pueden no

necesariamente darse en el área afectada bajo estudio. Por ejemplo, en el caso mencionado de reciclaje de metales, el cual presenta muy elevados niveles de ahorros de energía eléctrica y combustibles, en nuestro país solo es realizado el proceso de reciclaje, mientras que la fabricación de metal virgen es realizada en el exterior. Por esta razón, los ahorros energéticos se dan fuera de fronteras y no impactan directamente sobre la matriz energética nacional.

A pesar de esto, aunque los aspectos económicos no han sido objeto de estudio del presente trabajo, este escenario provoca la disminución de la importación de los materiales vírgenes, disminuyendo la exportación de divisas y mejorando la balanza comercial.

Los sistemas que incluyen la recuperación de materiales requieren una logística de mayor complejidad en lo que se refiere al manejo de los residuos. Más allá de esto, los aspectos ambientales y energéticos asociados a la recolección y transporte de un mayor número de corrientes de residuos pueden ser considerados insignificantes frente a los beneficios obtenidos en el reciclaje y sustitución de materiales vírgenes.

En este sentido, a partir de los resultados obtenidos es posible concluir que los aportes que genera la incorporación de un sistema de separación de la fracción húmeda de residuos para su tratamiento biológico, no representan grandes beneficios respecto a ninguno de los aspectos evaluados en el modelo.

No obstante, el retiro de la fracción húmeda de los residuos puede ser muy beneficioso desde un punto de vista técnico para el proceso de incineración masiva de la fracción mixta de residuos, ya que de esta manera se evita el ingreso de grandes cantidades de residuos con bajo poder calorífico y elevado contenido de humedad, reduciendo el tamaño necesario de la planta incineradora. Además, de esta manera se logra una operación de incineración más sostenible y con un menor requerimiento de combustible auxiliar para mantener la temperatura de la combustión.

Si bien no ha sido analizada en el presente trabajo, otra posible alternativa para la fracción húmeda corresponde a su inclusión en sistemas de gestión de otras corrientes de residuos, como son los RSI, que implementen unidades de tratamiento biológico y tengan capacidad para recibir estos residuos.

8.3 Incertidumbres y limitaciones

La principal limitación encontrada en el desarrollo del análisis realizado radica en la falta de datos actualizados respecto a la caracterización de los RSU generados. Se considera de gran importancia para la metodología planteada contar información precisa respecto a la cantidad y composición de los residuos, ya que de otra manera, los resultados obtenidos no se ajustan a la realidad y las conclusiones a las que se llega pueden ser equivocadas.

Debido a la incertidumbre en la composición de los residuos, fue analizada la sensibilidad de los escenarios propuestos frente a un cambio de la composición de los residuos. Los resultados obtenidos indican que, a excepción de algunos aspectos particulares, el cambio de composición no implica grandes cambios en el desempeño de los sistemas estudiados.

Por otro lado, resultaría de gran interés en la caracterización de los residuos generados, además de la determinación de la composición para cada material, la determinación de si éstos serían efectivamente reciclados, de manera de poder contar con un panorama del potencial real del proceso de reciclaje y el nivel de clasificación que puede ser alcanzado. Esto se debe a que para muchos materiales no se poseen capacidades de reciclaje. Entre

estos se pueden mencionar los materiales compuestos, algunos tipos de plástico y vidrio, y papel sucio.

En este sentido, también existe una limitación en el modelo relacionada al proceso de reciclaje, ya que se asume una funcionalidad de los materiales reciclado igual que para los materiales vírgenes, lo cual no es necesariamente cierto en todos los casos. Para corregir esta limitación es posible incorporar un factor de sustitución de los materiales vírgenes para cada uno de los materiales reciclables. Algo similar ocurre para la aplicación del bioabono producido y su capacidad de desplazar a los fertilizantes sintéticos. Además, el modelo no incorpora los beneficios ambientales en cuanto a la capacidad del bioabono en mejorar las características del suelo y el aporte de micronutrientes.

Otra limitación del modelo asumido corresponde a que la recolección y transporte de residuos no sigue un comportamiento lineal. Esto provoca que exista un punto en el cual al aumentar los esfuerzos para lograr mayores tasas de recolección, los aspectos ambientales derivados de esta operación se incrementan en una mayor proporción. Algo similar ocurre en escenarios con tasas de recuperación de materiales muy bajas, en los cuales los beneficios no logran compensar los aspectos ambientales asociados.

Respecto a los potenciales impactos ambientales evaluados, el modelo desarrollado no permite realizar la ponderación teniendo en cuenta consideraciones locales acerca de las características del ambiente receptor. La utilización de factores locales en la caracterización de la atmósfera, suelos y cuerpos de agua, así como la vulnerabilidad de los ecosistemas permite profundizar en la potencialidad real de los impactos. Si bien a nivel internacional existen diversos estudios sobre la aplicación de estos factores, no existen experiencias a nivel local.

En relación a la validación de la información utilizada en el desarrollo del modelo, su aplicación requiere la adopción de una serie de datos para los cuales en muchos casos sólo fue posible asumir valores de bibliografía. Esto ocurre principalmente en la modelación de las condiciones de operación y desempeño de los procesos unitarios planteados. Si bien en algunos casos no existe otra solución, ya que se trata de procesos hipotéticos para los cuales no existen experiencias a nivel local, en otros casos esta carencia en la información se debe a la falta de registros y mediciones de los procesos implicados.

La aplicabilidad de los datos utilizados fue evaluada mediante el análisis comparativo de la información proveniente de diversas referencias

internacionales especializadas en este tipo de estudios; seleccionando la información según el año de su publicación, su origen y la similitud con la situación modelada.

8.4 Identificación de oportunidades

Ante la necesidad de buscar alternativas para la gestión de RSU, la incineración aparece como una tecnología por demás atractiva para el tratamiento y aprovechamiento energético de los residuos. De acuerdo a lo anteriormente expresado, este proceso implica el máximo nivel de revalorización energética de los materiales no reciclables, aunque requiere de un sistema de control adecuado y permanente de las emisiones producidas, así como de un plan de mitigación para evitar el riesgo de mayores impactos.

De forma de maximizar los beneficios ambientales y energéticos, la incineración debe ser acompañada de la recuperación de materiales reciclables. La coexistencia de ambos procesos se presenta como posible y complementaria en los esfuerzos para optimizar los resultados. No obstante, como ya fue mencionado anteriormente, ante una capacidad instalada de incineración de residuos, al aumentar las tasas de recuperación y reciclaje de materiales, el proceso de incineración se podría ver afectado no sólo por

reducir la generación eléctrica, sino también por verse su capacidad sobredimensionada frente a la disminución del ingreso de residuos. Esto provocaría que la incineración se torne inviable técnica y económicamente. Por lo tanto, es necesario continuar profundizando el estudio con el fin de encontrar hasta qué punto es conveniente fomentar la recuperación de materiales en un escenario en que coexistan ambas operaciones.

Entre los materiales a ser recuperados, si bien todos muestran considerables beneficios ambientales y energéticos, se destacan especialmente los ahorros derivados del reciclaje de metales. Por lo tanto, todos los esfuerzos posibles para la clasificación y recuperación de este tipo de materiales, se verán reflejados en importantes beneficios ambientales y energéticos.

Si bien existen diversos mecanismos posibles para lograr la clasificación de residuos para su recuperación, se considera que la separación en origen representa la metodología que puede fomentar los mayores beneficios. La separación en origen, sea ésta de forma voluntaria u obligatoria, permite obtener una mejor calidad de los materiales clasificados, ya que evita la contaminación con otros residuos y reduce los mayores esfuerzos necesarios para efectuar la clasificación de los residuos mezclados.

Para lograr niveles aceptables en la participación de la clasificación en origen de residuos, los sistemas que implican recuperación de materiales deben estar acompañados de fuertes campañas de concientización y sensibilización dirigidas a la población. Estas campañas información deben basarse en comunicar de forma precisa la forma en que debe ser realizada la separación y cuáles son los beneficios que se obtienen como consecuencia.

A su vez, la implementación de un sistema amplio de recuperación de materiales, debe ser la base para formalizar las actividades de los clasificadores informales, las cuales son humanas y ambientalmente inaceptables. Para ello se requiere la profundización del estudio de los aspectos sociales necesarios para alcanzar niveles adecuados de formalización.

En otro sentido, cabe señalar que los esfuerzos necesarios para impulsar la separación en origen de la fracción húmeda para su tratamiento biológico, lo que implica una considerable complejización de la logística del sistema, provoca que ésta pueda no resultar atractiva. Sin embargo, como ya fue mencionado anteriormente, el retiro de esta fracción implica importantes mejoras en la operación del proceso de incineración. Estas mejoras podrían

lograrse mediante la separación de estos materiales mediante otros sistemas, como pueden ser plantas de clasificación semiautomáticas.

Con el objetivo de continuar profundizando las oportunidades de mejora de los sistemas de gestión de residuos, se considera necesaria la incorporación a este tipo de estudios de las otras fracciones de residuos que no fueron incluidas en el presente trabajo. Entre estas se desatacan los RSI, los cuales presentan algunos componentes que pueden encontrar alternativas a su tratamiento y disposición si se incluyen junto a los RSU en un sistema único de gestión. De esta manera, es posible lograr un sistema verdaderamente integral, que proporcione soluciones al manejo de todos los residuos y todas las fuentes de generación.

Por último, se considera necesaria la incorporación de las dimensiones sociales y económicas en el análisis de las alternativas planteadas, con el fin de evaluar la factibilidad real de su implementación, ya que se consideran aspectos fundamentales para alcanzar la sustentabilidad del sistema.

Como ya ha sido mencionado en diversas ocasiones, se requiere de impulsar la formalización de las actividades de los clasificadores de residuos como

actores clave dentro de los sistemas de gestión y su inserción en la sociedad.

Además, la participación de la población es esencial para el correcto funcionamiento de cualquier sistema de gestión de residuos que se adopte. Por lo tanto, deben dedicarse los esfuerzos necesarios para difundir y concientizar a la población respecto a todas las iniciativas propuestas, así como de los beneficios que éstas conllevan.

Para asegurar la sustentabilidad de un sistema de gestión es de gran importancia llevar a cabo un análisis económico-financiero, determinando los costos y beneficios, directos e indirectos, y la viabilidad financiera de cada una de las opciones evaluadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alumex S.A. <http://www.alumex.com.uy/> (último ingreso en el año 2013).

Aluminios del Uruguay S.A. <http://www.aluminios.com/> (último ingreso en el año 2013).

Arena, U., Mastellone, M.L., Perugini, F., (2003). "The environmental performance of alternative solid waste management options: a life cycle assessment study". *Chemical Engineering Journal*. N°96, pp. 207-222.

Baere, Luc De. The DRANCO technology: a unique digestion technology for solid organic waste. *Organic Waste Systems nv.* (S/A).

Barrenechea, P., González, I., Croce, C., (2003). Estudio de mercado: materiales reciclables de residuos sólidos urbanos.

Beledo, L. División Limpieza de la IdeM. Economista. Entrevista realizada el día 16 de Octubre de 2012.

Bianchini, A., Pellegrini, M., Sacconi, C., (2011). "Material and energy recovery in integrated waste management system - An Italian case study on quality of MSW data". *Waste Management*. . N°31, pp. 2066-2073.

Boer, J. den, Boer, E. den, Jager, J. (2007). "LCA-IWM: a decision support tool for sustainability assessment of waste management systems". *Waste Management*. N°27, pp. 1032-1045.

Broggi, L.E., (2011). "Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio". *Proyecto Racional de Productos de Mercurio en Uruguay*. DINAMA/ONUDI/PNUMA/Centro de Basilea.

Burnley, S., et al., (2011). “Energy implications of the thermal recovery of biodegradable municipal waste materials in the United Kingdom”. *Waste Management*. N°31, pp. 1949-1959.

Buttol, P., et al, (2007). “LCA of integrated MSW management systems: case study of the Bologna District”. *Waste Management*. N°27, pp. 1059-1070.

Carlsson Reich, M., (2005). “Economic assessment of municipal waste management systems – Case studies using a combination of life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC)”. *Journal of Cleaner Production*. N°13, pp. 253-263.

CEMPRE, (2010). *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. 3ed. São Paulo, Brasil. ISBN 978-85-87345-02-8.

CEMPRE Uruguay. <http://www.cempre.org.uy> (último ingreso en el año 2013).

Chang, Y.H., Chen, W.C., Chang, N.B. (1998). “Comparative evaluation of RDF and MSW incineration”. *Journal of Hazardous Materials*. N°58, pp. 33-45.

Charbonie, F. División Limpieza de la IdeM. Jefe de la Regional Este. Entrevista realizada el día 12 de Setiembre de 2012.

Cherubini, F., Bargigli, S., Ulgiati, S., (2009). “Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: landfilling, sorting plant and incineration”. *Energy*. N°34, pp. 2116-2123.

Consonni, S., Giugliano, M., Grosso, M., (2005). “Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste. Part. A: mass and energy balances”. *Waste Management*. N°25, pp. 123-135.

Cristal Pet S.A. <http://www.cristalpet.com.uy/> (último ingreso en el año 2014).

CSI Ingenieros - Estudio Pittamiglio, (2011). Información de base para el diseño de un plan estratégico de residuos sólidos. Uruguay.

Depósito Pedernal S.A. <http://depositopedernal.com.uy/> (último ingreso en el año 2014).

DINAMA, (2002/2003). Inventario Nacional de Liberaciones de Dioxinas y Furanos. Plan Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo, Uruguay.

Dirección Nacional de Energía (DNE). Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM). Estadísticas energéticas:
<http://www.dne.gub.uy/publicaciones-y-estadisticas/energia-electrica/> (último ingreso en el año 2014).

Dirección Nacional de Energía (DNE). Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM). Política Energética 2005 – 2030:
<http://www.dne.gub.uy/documents/49872/0/Pol%C3%ADtica%20energ%C3%A9tica%202005-2030?version=1.0&t=1378917147456> (último ingreso en el año 2014).

Dirección Nacional de Meteorología. Estadísticas Climatológicas:
<http://meteorologia.gub.uy/index.php/estcli> (último ingreso en el año 2014).

Dumas, R.D., (1999). Energy usage and emissions associated with electric energy consumption as part of a solid waste management life cycle inventory model. Revision 2. Department of Civil Engineering, North Carolina State University.

ECOPET S.A. <http://ecopet.net/2008/home.html> (último ingreso en el año 2013).

Ekvall, T., Assefa, G., Bjorklund, A. Eriksson, O., Finnveden, G., (2007). “What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management”. *Waste Management*. N°27, pp. 989-996.

European Environment Agency, (1997). *Life Cycle Assessment. A guide to approaches, experiences and information sources*. Environmental Issues Series N°6.

European Environment Agency, (2006). *Paper and cardboard – recovery or disposal? Review of life cycle assessment and cost-benefit analysis on the recovery and disposal of paper and cardboard*. Technical report N°5. ISBN 92-9167-783-3.

FICHTNER-LKSur, (2004). *Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana. Estudios Básicos. Tomo II: Residuos Sólidos Urbanos*. Programa de Saneamiento de Montevideo y Área Metropolitana. Tercera Etapa Subproyecto. República Oriental del Uruguay - Oficina de Planeamiento y Presupuesto - Dirección de Proyectos de Desarrollo.

FICHTNER-LKSur, (2005). *Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana. Plan Director. Tomo II: Residuos Sólidos Urbanos.* Programa de Saneamiento de Montevideo y Área Metropolitana. Tercera Etapa Subproyecto. República Oriental del Uruguay - Oficina de Planeamiento y Presupuesto - Dirección de Proyectos de Desarrollo.

Finnveden, G., (1999). “Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems”. *Resources, Conservation and Recycling*. N°26, pp. 173-187.

Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., Moberg, A., (2005a). “Life cycle assessment of energy from solid waste – part 1: general methodology and results”. *Journal of Cleaner Production*. N°13, pp. 213-229.

Finnveden, G., Moberg, A., Johansson, J., Lind, P., (2005b). “Life cycle assessment of energy from solid waste – part 2: landfilling compared to other treatment methods”. *Journal of Cleaner Production*. N°13, pp. 231-240.

Gerdau S.A. http://www.gerdau.com.uy/index_1.html (último ingreso en el año 2014).

González, M.J. CEMPRE Uruguay (Compromiso Empresarial para el Reciclaje). Entrevista realizada el día 19 de Setiembre de 2012.

González, M.J., Nario, A., Azpiroz, J., (2013). Proceso técnico y político para la definición de una estrategia para instrumentar una solución consensuada a la disposición final de residuos urbanos en el Uruguay. 5º Congreso Interamericano de Residuos Sólidos.

Guinée, J.B., (2004). *Handboook on Life Cycle Assesment. Operational guide to the ISO Standards.* Kluwer Academic Publishers. ISBN: 1-4020-0228-9.

Heijungs, R., Guinée, J.B., Huppes, G., Lankreijer, R.M., Udo de Haes, H.A., Wegener Sleeswijk, A., (1992). *Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds.* Leiden. Centre of Environmental Science. ISBN 90-5191-064-9.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). Censos 2011:
<http://www.ine.gub.uy/censos2011/index.html> (último ingreso en el año 2013).

Intendencia de Canelones. Noticias:
<http://www.imcanelones.gub.uy/?q=node/7621>

Intendencia de Montevideo. División Limpieza. Plano de circuitos de recolección de residuos:
<http://www.montevideo.gub.uy/ciudadania/desarrollo-ambiental/limpieza/>
(último ingreso en el año 2013).

Intendencia de Montevideo. División Limpieza. Plano de ubicación de contenedores de materiales reciclables:
<http://www.montevideo.gub.uy/ciudadania/desarrollo-ambiental/limpieza/contenedores/> (último ingreso en el año 2014).

Intendencia de Montevideo. Plan “Tu envase nos sirve”:
<http://www.montevideo.gub.uy/ciudadania/campanas/tu-envase-sirve> (último ingreso en el año 2014).

Intendencia de Montevideo - PNUD/PNUMA, (2012). *Caracterización de la población de clasificadores de residuos de Montevideo.* Montevideo, Uruguay. 2012. ISBN 978-92-990064-7-4.

International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). RAINS Model (Regional Air Pollution Information and Simulation): <http://www.iiasa.ac.at/> (ultimo ingreso en el año 2014).

ISO/TR 14047, (2012). Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations. 2nd ed.

ISO/TR 14048, (2002). Environmental management - Life cycle assessment - Data documentation format. 1st ed.

ISO/TR 14049, (2012). Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis. 2nd ed.

Komilis, D., Ham, R., (2000). *Life cycle inventory and cost model for mixed municipal and yard waste composting.* University of Wisconsin. Research Triangle Institute.

Liamsanguan, C., Gheewala, S.H., (2008). "LCA: a decisión support tool for environmental assessment of MSW management systems". *Journal of Environmental Management*. N°87, pp. 132-138.

LKSur – ALUR – MIEM/DNE. Presentación del estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos con Fines Energéticos el día 17 de Mayo de 2013 en las instalaciones de la DNE.

Matsui, Y., Tanaka, M. y Ohsako, M., (2007). “Study of the effect of political measures on the citizen participation rate in recycling and on the environmental load reduction”. *Waste Management*. N°27, pp. S9-S20.

McDougall, F.R., White, P.R., (2004). *Gestión Integral de Residuos Sólidos: Inventario de Ciclo de Vida*. Procter & Gamble Industrial, S.C.A. ISBN 980-12-0829-5.

Merrild, H., Damgaard, A., Christensen, T.H., (2008). “Life cycle assessment of waste paper management: the importance of technology data and system boundaries in assessing recycling and incineration”. *Resources, Conservation and Recycling*. N°52, pp. 1391-1398.

Merrild, H., Damgaard, A., Christensen, T.H., (2009). “Recycling of paper: accounting of greenhouse gases and global warming contributions”. *Waste Management & Research*. N° 27, pp. 746-753.

Metcalf & Eddy (1996). *Ingeniería de las aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Tomo I*. McGraw-Hill, Inc. USA. ISBN 970-10-1005-1.

Montejo, C., Costa, C., Ramos, P., Márquez, M., (2011). “Analysis and comparison of municipal solid waste and reject fraction as fuels for incineration plants”. *Applied Thermal Engineering*. N°31, pp. 2135-2140.

Municipio CH. Recolección selectiva de residuos secos:
<http://municipioch.montevideo.gub.uy/clasifica>

MVOTMA - DINAMA - Unidad de Cambio Climático, (2006). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2002*. Proyecto URU/05/G32 - FMAM - PNUD.

National Renewable Energy Laboratory. <https://www.lcacommons.gov/nrel/> (último ingreso en el año 2014).

Organic Waste System (OWS N.V.). Sistema DRANCO:
http://www.ows.be/household_waste/dranco/ (ultimo ingreso en el año 2014).

Panel Inetrubernamental para el Cambio Climático (IPCC):
<https://www.ipcc.ch/index.htm> (último ingreso en el año 2013).

Penido Monteiro, J.H., (2006). *Manual de gestión integrada de residuos sólidos municipales en ciudades de América Latina y el Caribe.*

Presidencia de la República Oriental del Uruguay, (2007). *Libro Blanco del Área Metropolitana.*

REPAPEL. <http://www.repapel.org/> (último ingreso en el año 2014).

Research Triangle Institute. Municipal Solid Waste Decision Support Tool:
<https://mswdst.rti.org/tutorial.htm> (último ingreso en el año 2014).

Rigby, H., Smith, S., (2011). *New markets for digestate from anaerobic digestion.* Waste & Resources Action Programme (WRAP). Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London.

Rotondaro Ltda. <http://rotondaro.com.uy/blog/es> (último ingreso en el año 2013).

RTI International, (2003). *Life-cycle inventory data sets for material production of aluminum, glass, paper, plastic and steel in North America.*

Sanchez, R., Villalba, L., Mora, W., Hernández, R., (2000). “Aplicación de la técnica inventario de ciclo de vida (ICV) en el desarrollo de sistemas para el manejo integrado de desechos sólidos municipales. Caso de estudio: Municipio Caroní, Estado de Bolívar, Venezuela - Resultados preliminares”. *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitaria e Ambiental*. Porto Alegre.

Schlamadinger, B., Apps, M., Bohlin, F., Gustavsson, L., Jungmeier, G., Marlnad, G., Pingoud, K., Savolainen, I., (1997). “Towards a standard methodology for greenhouse gas balances of bioenergy systems in comparison with fossil energy systems”. *Biomass and bioenergy*. Nº 6, pp. 359-375.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. McGraw-Hill/Interamericana de España S.A. ISBN: 84-481-1766-2.

Themelis – Diaz, (2012). *Estudio de prefactibilidad técnica y económica para la instalación de capacidad de generación de energía a partir de residuos (WTE) en Uruguay*. Themelis Associates.

Thomas, B., McDougall, F., (2005). “International expert group on life cycle assessment for integrated waste management”. *Journal of Cleaner Production*. Nº13, pp. 321-326.

Thorneloe, S., (2000a). *Default data and data input requirements for the municipal solid waste management decision support tool*. North Carolina State University - Research Triangle Institute.

Thorneloe, S., (2000b). *A decision support tool for assessing the cost and environmental performance of integrated municipal solid waste management strategies. Users manual.* North Carolina State University - U.S. Environmental Protection Agency. Research Triangle Institute.

Thorneloe, S.A., Weitz, K., Jambeck, J. (2007). “Application of the US decision support tool for materials and waste management”. *Waste Management*. Nº27, pp. 1006-1020.

Ugliati, S., Raugei, M., Bargigli, S., (2006). “Overcoming the inadequacy of single-criterion approaches to Life Cycle Assessment”. *Ecological Modeling*. Nº190, pp. 432-442.

Unidad de Cambio Climático - DINAMA – MVOTMA, (2010). *Tercera comunicación nacional a la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.* Uruguay, Proyecto URU/05/G32 - FMAM – PNUD.

UNIT-ISO 14040:2006. Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia.

UNIT-ISO 14044:2006. Gestión Ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices.

Universal Plastic S.A. <http://www.universalplastic.com.uy/> (último ingreso en el año 2013).

US EPA, (1997). *Full Cost Accounting for Municipal Solid Waste Management: a handbook.* Solid Waste and Emergency Response.

US EPA, (1998). *Greenhouse gas emissions from management of selected materials in municipal solid waste.* Solid Waste and Emergency Response.

Wenisch, S., Rousseaux, P., Métivier-Pignon, H., (2004). "Analysis of technical and environmental parameters for waste-to-energy and recycling: household waste case study". *International Journal of Thermal Sciences*. N°43, pp. 519-529.

Werba S.A. <http://www.werbasa.com/> (último ingreso en el año 2013).

Winkler, J., Bilitewski, B., (2007). "Comparative evaluation of life cycle assessment models for solid waste management". *Waste Management*. N°27, pp. 1021-1031.

Zhang, D.Q., Soon, K., Gersberg, R.M., (2010). "Municipal solid waste management in China: status, problems and challenges". *Journal of Environmental Management*. N°91, pp. 1623-1633.



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Tesis para optar al Título de Magíster
en Ingeniería Ambiental

ESTUDIO COMPARATIVO DE DISTINTOS
SISTEMAS DE GESTIÓN INTEGRAL DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL
ÁREA METROPOLITANA DE MONTEVIDEO
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

ANEXOS

Autor: VÍCTOR EMMER
Director de Tesis: MAURICIO PASSEGGI

Montevideo, Uruguay
2014

Víctor Emmer

Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

Montevideo, Uruguay, 2014

“El manejo ambientalmente saludable de los residuos es más que la simple eliminación o aprovechamiento, a través de métodos seguros, de los residuos generados. Es tratar de encarar la causa fundamental del problema a fin de cambiar los patrones no sustentables de producción y consumo. Esto implica el uso del ciclo vital, que ofrece la oportunidad única de conciliar el desarrollo con la protección del medio ambiente”.

Agenda 21, Capítulo 21

Conferencia de las Naciones Unidas
sobre Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

Río de Janeiro, 1992

TABLA DE CONTENIDO

TOMO II: ANEXOS

TABLA DE CONTENIDO	iv
ANEXO I: DIAGNÓSTICO DE LA GESTIÓN DE RSU EN EL AMM	6
I.1 Introducción.....	7
I.2 Características del AMM	7
I.3 Actores involucrados y marco normativo asociados a la gestión de RSU.....	11
I.4 Generación de RSU	15
I.5 Sistema actual de gestión de RSU en el AMM.....	23
I.6 Aspectos económicos de la gestión	37
I.7 Sector informal	41
I.8 Mercado de materiales reciclables	49
I.8.1 Introducción.....	49
I.8.2 Papel y cartón	51
I.8.3 Plásticos.....	54
I.8.4 Vidrio	57
I.8.5 Metales ferrosos	59
I.8.6 Aluminio	62
I.8.7 Cobre	64
I.9 Política energética nacional y su relación con los RSU.....	65
I.10 Residuos sólidos industriales	67
ANEXO II: DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS UNITARIOS	71
II.1 Introducción.....	72
II.2 Separación en origen	73
II.3 Recolección y transporte	76
II.4 Incineración	77
II.5 Plantas de clasificación y acondicionamiento	85
II.6 Reciclaje.....	87
II.7 Tratamiento biológico	98
II.8 Disposición final	103

ANEXO III: RESULTADOS DEL MODELO.....	107
III.1 SO_EP	108
III.2 S1_EP	118
III.3 S2_EP	128
III.4 S3_EP	138
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

ANEXO I: DIAGNÓSTICO DE LA GESTIÓN DE RSU EN EL AMM

I.1 Introducción

A continuación se presenta el análisis en profundidad sobre la situación actual vinculada a la generación y gestión de RSU en el AMM. Además de servir como información complementaria a partir de la cual surgen los resultados y conclusiones vertidas en el cuerpo del informe (ver 3. CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU EN EL AMM), se incluyen también algunas consideraciones sobre otros aspectos relacionados, que permiten un mayor conocimiento del sector y sus posibilidades de desarrollo.

I.2 Características del AMM

El AMM se ubica en el centro-sur del Uruguay y comprende todas las zonas urbanas que se encuentran próximas a la ciudad de Montevideo, abarcando totalmente el departamento de Montevideo, y parte de los departamentos de Canelones y San José.

La ciudad de Montevideo representa el núcleo central del área metropolitana, concentrando la mayor parte de la población, así como las principales actividades económicas y de servicios.

Además de Montevideo, el área metropolitana incluye otros fraccionamientos urbanos y suburbanos diseminados en la periferia, emplazados principalmente sobre las rutas de acceso a la ciudad de Montevideo.

Históricamente, el AMM surge a través de un proceso de desplazamiento de la población desde el Montevideo urbano hacia las periferias y localidades cercanas. Esta expansión demográfica del territorio es de gran importancia en el diseño y adopción de estrategias de ordenamiento y en la implantación de los servicios colectivos, como puede ser la gestión de residuos.

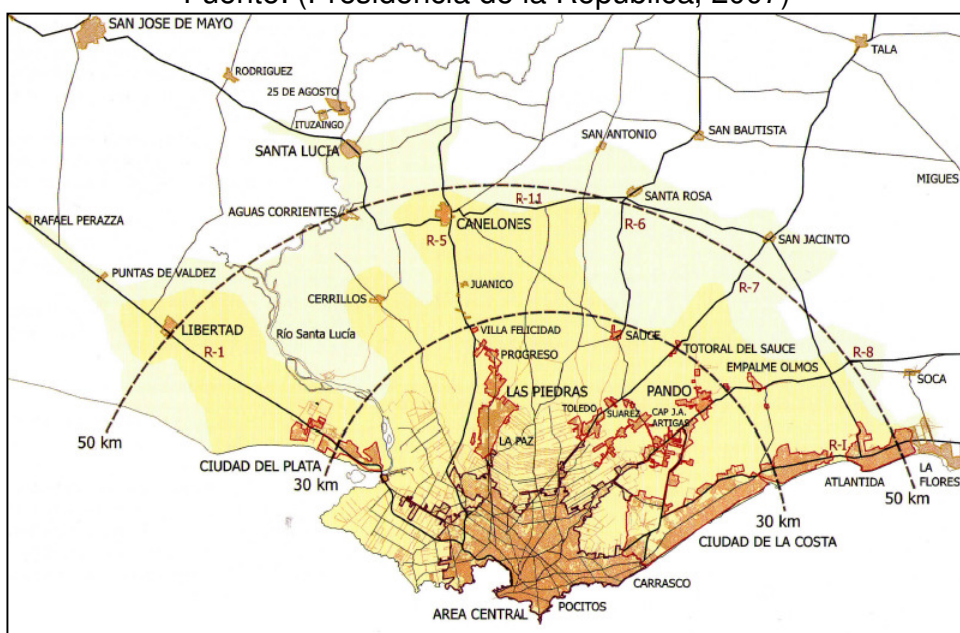
Algunos de estos centros urbanos incluyen la Ciudad de la Costa hacia el este; Pando, Las Piedras, La Paz, Barros Blancos y Toledo, entre otros, hacia el norte; y Ciudad del Plata hacia el oeste.

La definición del AMM utilizada en el presente estudio establece la zona abarcada dentro de un radio de aproximadamente 30 km desde el centro de Montevideo, conformando la primera corona metropolitana (Presidencia de la República, 2007). Existe otra definición del área metropolitana que adopta una segunda corona trazada a 50 km desde el centro de Montevideo, aunque ésta tiene otros objetivos en el ordenamiento territorial.

En la siguiente figura se muestra el mapa del AMM, con las coronas metropolitanas definidas y las principales localidades que la conforman.

Figura I.1. Mapa de delimitación del AMM.

Fuente: (Presidencia de la República, 2007)



De acuerdo al último censo realizado en nuestro país en el año 2011 por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE)¹, la población total correspondiente al AMM alcanza aproximadamente los 1.670.000 habitantes, representando el 51 % de la población total del país. De la población total del AMM, el 79 % corresponde al departamento de Montevideo, 19 % al departamento de Canelones y el restante 2 % al departamento de San José.

¹ <http://www.ine.gub.uy/censos2011/index.html>

Tabla I.1. Población de las principales localidades del AMM según Censo 2011.

Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas
(<http://www.ine.gub.uy/censos2011/index.html>)

Departamento	Localidad	Población	Viviendas
Montevideo	Montevideo	1.319.108	520.538
Canelones	Ciudad de la Costa	112.449	43.486
	Barros Blancos	31.650	10.714
	Pando	25.949	10.048
	Toledo	23.505	7.825
	La Paz	20.526	7.432
	Las Piedras	71.268	24.588
	Sauce	6.132	2.405
	Joaquín Suárez	6.570	2.360
	Progreso	16.244	5.396
San José	Ciudad del Plata	31.146	11.245
Total AMM		1.664.547	646.037
Total país		3.286.314	1.389.740

Según los datos del censo anterior (Censo 2004 – Fase I), la tasa de crecimiento de la población en este período es muy baja, ubicándose para Montevideo en el -0,07 %, mientras que para Canelones y San José son del 0,68 y 0,19 %², respectivamente.

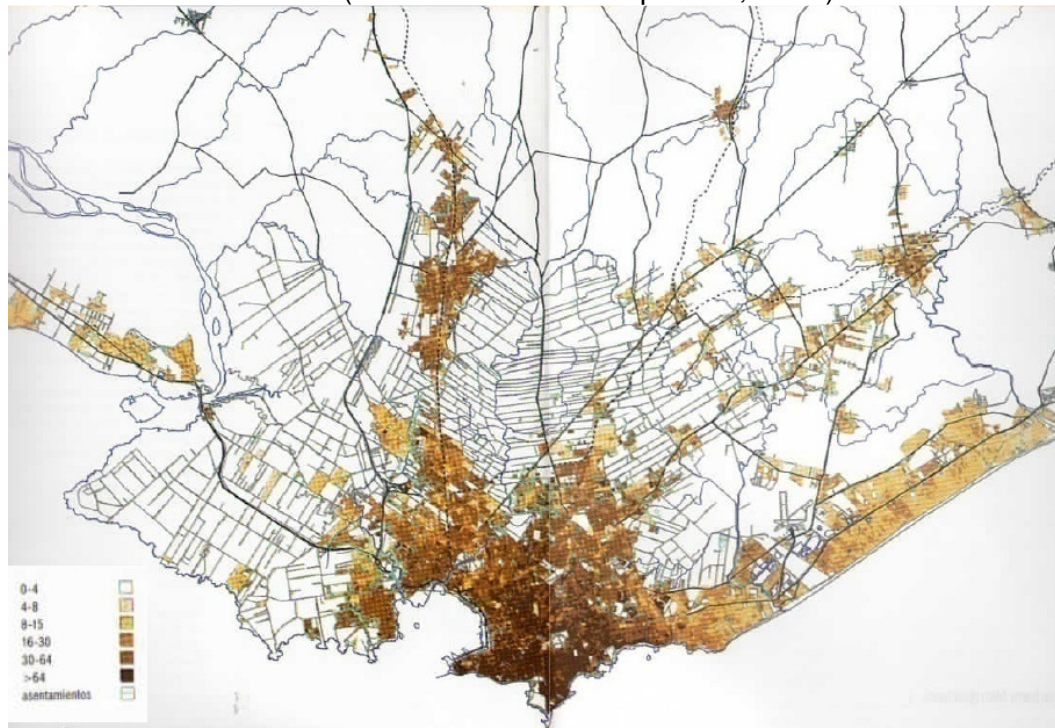
En cuanto al número de viviendas existentes en el AMM, el censo del 2011 contabiliza un total algo menor a las 650.000 viviendas, significando un

² Las tasas de crecimiento indicadas para Canelones y San José corresponden al total departamental y no para las localidades ubicadas dentro del AMM.

promedio de 2,6 habitantes/vivienda. En la siguiente figura se muestra la densidad de viviendas en el cono urbano metropolitano.

Figura I.2. Densidad de viviendas en el AMM (viviendas/hectárea).

Fuente: (Presidencia de la República, 2007)



I.3 Actores involucrados y marco normativo asociados a la gestión de RSU

La identificación de los actores involucrados y sus interrelaciones en el sistema de gestión de RSU es de gran importancia en la planificación

estratégica, ya que se requiere la participación de todos para cumplir con los intereses de cada uno y alcanzar resultados óptimos del sistema.

Los actores clave son aquellos que intervienen en las diferentes etapas a lo largo de todo el ciclo de vida de los residuos y poseen un rol específico en el sistema de gestión. Se pueden clasificar en generadores, responsables del sistema y operadores de las unidades que lo componen.

Los generadores son todas aquellas personas físicas o jurídicas que generan algún tipo de residuos. Comprenden a la población, que genera residuos domiciliarios en sus viviendas, y a los pequeños y grandes generadores, como son instituciones públicas, comercios, centros de salud, etc. que generan residuos asimilables a urbanos como producto de sus actividades, incluyendo también a los servicios de limpieza y mantenimiento de las áreas públicas.

De acuerdo a la normativa nacional, las Intendencias cuentan con la responsabilidad en el manejo de los RSU, debiendo garantizar la adecuada ejecución y fiscalización de los servicios prestados. Por otro lado, como referente en los asuntos ambientales a nivel nacional, el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA) tiene el cometido de control de las operaciones y regulación en la materia.

Por su parte, los operadores del sistema de gestión son los actores públicos o privados encargados de llevar a cabo las distintas tareas involucradas en el manejo de RSU, incluyendo la recolección y transporte, tratamiento, reciclaje y disposición final. Los operadores pueden ser las propias Intendencias, empresas privadas, ONGs y clasificadores informales, los cuales poseen determinado grado de interacción y articulación dentro del sistema.

El marco jurídico de nuestro país respecto a la gestión de residuos sólidos se encuentra escasamente desarrollado, especialmente en lo que se refiere a RSU. A continuación se enumeran y describen las principales normas existentes a nivel nacional y municipal relativas a los distintos aspectos asociados a la gestión de residuos, así como algunas normas referidas a corrientes específicas de residuos, que si bien pueden no estar relacionadas directamente con los RSU, aportan en la comprensión de las estrategias que son impulsadas para una adecuada gestión de los residuos.

- Ley N° 17.283 del 28 de Noviembre de 2000 (Ley General de Proyección del Ambiente): declara el interés general de la protección del medio ambiente y establece las disposiciones necesarias en distintas temáticas, como es el adecuado manejo y disposición de residuos cualquiera sea su tipo.
- Ley N° 9.515 del 1° de Noviembre de 1935 (Ley Orgánica Municipal): establece las competencias de los gobiernos municipales respecto a la prestación de servicios de limpieza de los espacios públicos, así como

de recolección, transporte, tratamiento y disposición de residuos domiciliarios.

- Ley N° 16.466 del 26 de Enero de 1994 (Ley de Evaluación de Impacto Ambiental) reglamentada por el Decreto 349/005 y sus modificaciones del Decreto 178/009: establece la necesidad de tramitar Autorización Ambiental Previa para la instalación de plantas de tratamiento y sitios de disposición final de residuos sólidos.
- Ley N° 17.894 del 29 de Diciembre de 2004 (Ley de Envases) reglamentada por el Decreto 260/007: establece las disposiciones necesarias para regular el uso de envases, previniendo la generación de residuos mediante la promoción de su valorización.
- Decreto 586/009 (Gestión de Residuos Sanitarios): establece las disposiciones necesarias para un manejo adecuado de residuos sanitarios.
- Decreto 152/013 (Gestión de Residuos de la Actividad Agrícola): establece las disposiciones necesarias para un manejo adecuado de residuos derivados de la actividad agropecuaria, hortifrutícola y forestal.
- Decreto 182/013 (Gestión de Residuos Industriales): establece las disposiciones necesarias para un manejo adecuado de residuos industriales y asimilados.
- Resolución N° 1468/02 de la Idem (Recolección de Residuos por Clasificadores): establece las disposiciones que deben cumplir los clasificadores de residuos urbanos y lo referente a su habilitación para llevar a cabo sus actividades.
- Digesto de la Junta Departamental de Montevideo, Volumen VI, Título IV (Higiene y Limpieza Pública): establece las disposiciones para la prestación de servicios de limpieza de las vías públicas,

especialmente en lo que se refiere a la recolección de residuos, de forma directa por la Intendencia o por terceros contratados por esta.

- Decreto N° 2.546 de la Junta Departamental de San José (Servicio Ambiental y Bromatología de Higiene): establece las competencias de servicios de limpieza y recolección de residuos al Departamento de Higiene de la Intendencia.
- Ordenanza General de Limpieza Pública de Canelones 72/97(Higiene y Limpieza Pública): establece las competencias de servicios de limpieza y recolección de residuos.

I.4 Generación de RSU

En cuanto a la generación de RSU, en la Tabla I.2 se detallan los datos por departamento presentados en los Estudios Básicos del PDRS (FICHTNER-LKSsur, 2004) para el año 2003. Cabe destacar que, si bien dicho informe posee ya varios años, éste representa el último estudio realizado en profundidad, con un diagnóstico completo de la situación, el cual continúa aún siendo utilizado como referencia.

Además, como ya fue mencionado anteriormente, la tasa de crecimiento de la población en los últimos años ha sido muy baja, por lo que los eventuales cambios en la tasa de generación de residuos respecto a la situación actual, puede explicarse por variaciones en los patrones de consumo y no por un aumento de la población.

Tabla I.2. Generación de RSU en el AMM de acuerdo a su origen.

Fuente: (FICHTNER-LKSsur, 2004)

Departamento	Generación total (ton/día)		
	RSD	RSDPG	RSU
Montevideo	685	1.210	1.678
Canelones	119-157	196	254
San José	12-16	20	25
AMM	816-858	1.426	1.957

De esta manera, la generación total de RSU alcanzaba las 1.957 toneladas diarias, lo que equivale a aproximadamente 715 mil toneladas anuales, de las cuales 86 % corresponden al departamento de Montevideo.

Considerando una población de aproximadamente 1.670.000 habitantes y 650.000 viviendas en todo el AMM (ver I.2 Características del AMM), la tasa media de generación de RSD según los datos del PDRS, era de 0,51 kg/hab·día y de 1,32 kg/vivienda·día. Por su parte, la tasa de generación de RSU era de aproximadamente 1,17 kg/hab·día, encontrándose dentro del rango típico a nivel internacional de 0,7 a 2,0 kg/hab·día de acuerdo a bibliografía consultada (CEMPRE, 2010).

En la tabla a continuación se detalla la generación de RSU en el AMM diferenciada según su origen y destino final.

Tabla I.3. Generación de RSU de acuerdo a su origen y destino final.

Fuente: elaboración propia a partir del procesamiento de datos de los Estudios Básicos del PDRS(FICHTNER-LKSur, 2004)

Destino	Tipo de gestión asociada	Generación
		(ton/año)
Sitio de disposición final	Recolección formal de RSDPG	257.460
	Levante de descartes	121.910
	Servicio municipal y contratos RSGG	13.870
	Gestión privada de RSGG	15.330
	Barrido y limpieza	51.830
	Otros	28.835
Recuperación y reciclaje	Recolección por el sector formal	3.431
	Recuperación por grandes generadores	35.040
	Recuperación por sector informal	152.282
Disposición inadecuada	Quema, cursos de agua, etc.	35.558
Generación total		715.546

A partir de estos datos podemos observar que la cantidad de residuos sólidos con destino a los SDF alcanzaba un valor de 489.235 ton/año, representando el 68 % del total de los residuos generados. Dentro de estos, el 52 % correspondía a la recolección formal de RSDPG, el 25 % a recolección de descartes, el 10 % a barrido y limpieza, y el resto se repartía entre grandes generadores y otros orígenes no identificados. Los residuos generados que no ingresaban al SDF correspondían a los residuos recuperados para reciclaje (27 % del total) y residuos con disposición final inadecuada (5 % del total).

Debido a que la recuperación de residuos por el sector formal y por grandes generadores era realizada a partir de sistemas consolidados, y que actualmente continúan operando en forma adecuada y sostenible, estos residuos pueden no ser considerados en los propósitos de evaluación de distintas alternativas de gestión que se realiza en los capítulos posteriores.

Esta observación no se aplica a los materiales recuperados por el sector informal, los cuales requieren ser incluidos en la corriente de residuos que ingresan a los sistemas de gestión a evaluar, ya que las condiciones en que este sector opera son inaceptables (ver I.7 Sector Informal) y se asume la ejecución de las medidas necesarias para la formalización de dichas actividades.

Por lo tanto, se considera que la cantidad de RSU generados en el AMM que pueden ser ingresados a los sistemas de gestión a ser evaluados alcanzaba un valor de **677.075 ton/año**.

En cuanto a la composición de los residuos, en la Tabla I.4 se detalla el porcentaje en peso de las fracciones que componen los RSDPG en los circuitos formales de recolección del AMM según la caracterización realizada en el PDRS determinada al ingreso al SDF.

Debido a que la caracterización fue realizada sobre los residuos que llegan al SDF provenientes de los circuitos de recolección de RSDPG, esta composición no incluye la actividad formal e informal de clasificación y recuperación de materiales reciclables, por lo que la composición real de los residuos generados pueden variar respecto a la indicada.

Tabla I.4. Composición de los RSDPG del AMM recolectados por el sector formal según caracterización en el SDF.

Fuente: (FICHTNER-LKSur, 2004)

Fracción	% en peso
Plásticos	1,2
Plásticos rígidos	0,8
Plásticos de película	9,8
Botellas de plástico	2,0
Vidrio	3,4
Textiles	2,1
Metales férreos	1,3
Metales no férreos	0,2
Papel	8,3
Cartón / cartulina	2,2
Hortalizas y materiales orgánicos	58,3
Residuos peligrosos / tóxicos	0,3
Madera, ramas de árboles	0,6
Cuero, cuerno, huesos, goma	0,5
Pañales	5,1
Materiales compuestos	1,0
Materiales inertes	2,1
Otros residuos	0,8
Total	100,0

En la Tabla I.5 se muestran las cantidades anuales de los materiales que eran recuperados por la actividad informal de recolección y clasificación en el año 2003 según el PDRS. Los materiales reciclables recuperados por los clasificadores se comercializan a pequeños y grandes depósitos, para ser luego exportados o transferidos a las distintas industrias para su procesamiento.

Tabla I.5. Cantidades de materiales recuperados y comercializados por el sector informal.

Fuente: (FICHTNER-LKSur, 2004)

Material	Cantidades recuperadas
	(ton/año)
Papel y cartón	53.112
Aluminio	1.794
Cobre	1.557
Bronce	2.193
Chatarra	23.448
Plástico	3.403
Vidrio	2.726
Orgánico	57.700
Otros	6.349
Total	152.282

Si bien la cantidad de clasificadores informales en el año 2003, al igual que la cantidad por éstos recolectada, puede diferir considerablemente en relación a la actualidad, dado que la situación económica y social en esos años se veía afectada por la crisis económica sufrida, no se cuenta con información actualizada al respecto. Por esta razón, se adoptan en una primera instancia

estos valores correspondientes a la recolección por el sector informal en la determinación de la cantidad y composición de los RSU a ser considerada en el presente informe.

A su vez, las cantidades de los materiales recuperados por los clasificadores pueden variar de forma importante, incluso en muy poco tiempo, debido a la dinámica del mercado de estos materiales que condiciona su extracción de los circuitos formales por parte de los clasificadores (ver I.8 Mercado de materiales reciclables).

Respecto a los residuos recolectados por barrido y limpieza de áreas públicas, estos no se encuentran incluidos en la composición de RSDPG indicada en la Tabla I.4. Para poder determinar el aporte de estos residuos a la composición global de RSU, es necesario suponer la naturaleza de los residuos provenientes de dicha corriente. Para ello se asume una composición del 50 % de residuos verdes (hojas, ramas, etc.), 25 % de inertes y 25 % de residuos asimilables a domésticos, con la misma composición de los RSDPG.

Integrando todas las consideraciones realizadas respecto a los residuos recolectados por el sector informal, y para el barrido y limpieza, dejando fuera los materiales recuperados por el sector formal y grandes generadores, se

obtiene la composición resultante de los RSU mostrada en la siguiente tabla. Estos son los residuos que son considerados en una primera instancia del presente estudio para la evaluación de los sistemas de gestión planteados (ver 4.2 Función y unidad funcional).

Tabla I.6. Composición y cantidades generadas de RSU generados en el AMM.

Fuente: elaboración propia a partir del procesamiento de datos del PDRS (FICHTNER-LKSur, 2004)

Fracción	Cantidades generadas	Composición
	(ton/año)	(% en peso)
Papel y cartón	104.133	15,4
Vidrio	19.248	2,8
Metales ferrosos	29.765	4,4
Metales no ferrosos	6.516	1,0
Plásticos rígidos	22.840	3,4
Plásticos laminados	47.620	7,0
Materiales orgánicos	340.992	50,4
Textiles	10.204	1,5
Residuos verdes	28.831	4,3
Otros	66.927	9,9
Total	677.075	100,0

Una característica de gran importancia es la densidad de los residuos recolectados, dado que esta condiciona la capacidad de recolección y transporte, así como el volumen ocupado en el SDF. En la siguiente tabla se muestran los pesos específicos de los materiales sueltos presentes en los RSU y la humedad típica de acuerdo a bibliografía consultada (Tchobanoglous, 1994). Los valores indicados corresponden a la densidad

de los residuos tal cual llegan a los contenedores de almacenamiento previo a su recolección.

Tabla I.7. Pesos específicos y humedad de los materiales sueltos.

Fuente: (Tchobanoglous, 1994)

Fracción	Peso específico (kg/m ³)		Humedad (%)	
	Rango	Valor típico	Rango	Valor típico
Papel y cartón	42 – 131	89	4 – 10	6
Vidrio	160 – 481	196	1 – 4	2
Metales ferrosos	50 – 160	89	2 – 4	3
Metales no ferrosos	65 – 240	160	2 – 4	2
Plásticos	42 – 131	65	1 – 4	2
Materiales orgánicos	131 – 481	291	50 – 80	70
Textiles	42 – 101	65	6 – 15	10
Residuos verdes	59 – 225	101	30 – 80	60

I.5 Sistema actual de gestión de RSU en el AMM

En la sección a continuación se mencionan algunas consideraciones sobre el sistema de gestión de RSU actual en el AMM. Las observaciones surgen del relevamiento de la información presente en los Estudios Básicos del PDRS (FICHTNER-LKSur, 2004) y en otros informes elaborados posteriormente (Themelis - Diaz, 2012; CSI Ingenieros - Estudio Pittamiglio, 2011). Además, con el fin de actualizar la información de estos estudios y conocer la tendencia en relación a estos temas, fueron realizadas entrevistas con

algunos de los actores clave de distintas instituciones relacionadas con la gestión de RSU³.

Como ya fue mencionado anteriormente, la gestión de RSU es responsabilidad de los correspondientes gobiernos departamentales, aunque existen algunas experiencias de cooperación entre los distintos departamentos del AMM, así como con otros organismos gubernamentales.

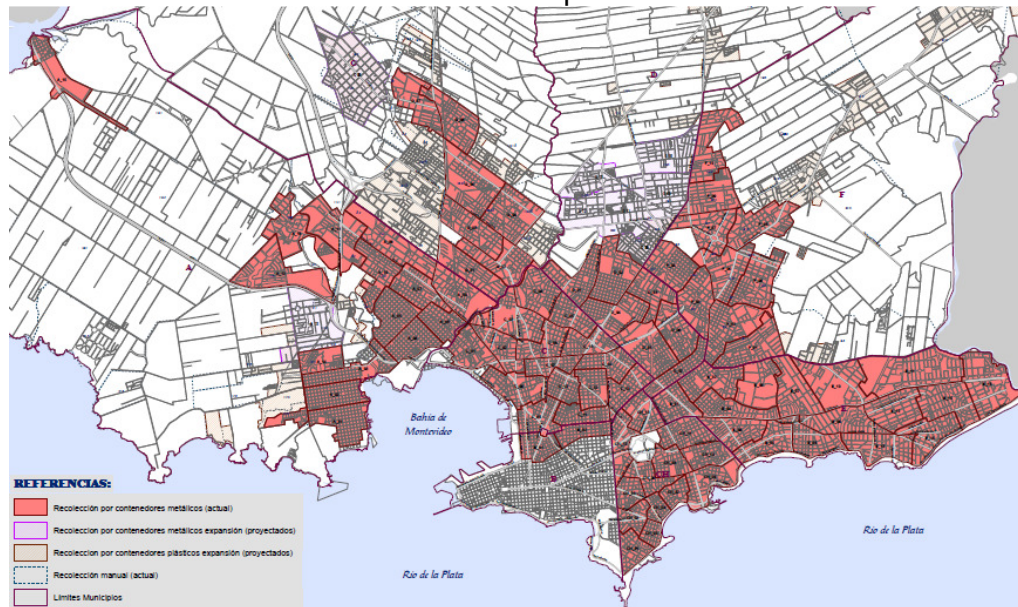
En Montevideo, esta tarea es responsabilidad de la División Limpieza del Departamento de Desarrollo Ambiental de la Intendencia. El servicio de recolección y transporte está dividido en las regionales Este, Oeste y Centro, estando esta última a cargo de una empresa tercerizada mediante un convenio con la IdeM.

El sistema actual de recolección de residuos domiciliarios, el cual se utiliza a partir de fines del año 2003, se compone de aproximadamente 8.700 contenedores metálicos de carga lateral con capacidades de 2,4 y 3,2 m³, los cuales están distribuidos por la ciudad y donde la población puede depositar sus residuos a cualquier hora del día.

³ Entrevistas realizadas al Ing. Federico Charbonie, Jefe de la Regional Este de la IdeM (12/09/2012) y a la Ec. Leticia Beledo de la División Limpieza de la IdeM (16/10/2012).

Figura I.3. Circuitos de recolección en el Departamento de Montevideo.

Fuente: <http://www.montevideo.gub.uy/ciudadania/desarrollo-ambiental/limpieza/>



El transporte de los residuos se realiza en camiones compactadores de carga lateral mecánica con una capacidad para 20 m³ o 10 ton. En promedio son realizados 2 viajes de camión por circuito para la recolección de los residuos, aunque en algunas ocasiones determinadas puede llegar a 3 viajes, siendo la frecuencia de recolección de 3 días a la semana.

En las zonas periféricas y rurales con baja densidad de población aún se realiza recolección manual en bolsas y el transporte en camiones compactadores de carga trasera de 14 m³.

La flota de camiones se compone actualmente de aproximadamente 100 camiones compactadores y 20 camiones abiertos, aunque la disponibilidad de estos es en general muy baja. De acuerdo al PDRS, se han registrado valores de disponibilidad de solo 55 %, encontrándose el resto de la flota en reparación o fuera de operación por otros motivos. Esta baja disponibilidad de recursos se debe a la falta de capacidad de mantenimiento de los vehículos y genera que en algunos momentos de altas tasas de generación el servicio de recolección se encuentre superado y no logre cubrir las necesidades del servicio.

El barrido y limpieza de los espacios públicos está a cargo de cada municipio, existiendo convenios con distintas ONGs que realizan dicha tarea en algunas zonas particulares. En general se evita que los residuos recolectados en el barrido ingresen al sistema de contenedores, debiendo transportar estos residuos en camiones de caja abierta y ser ayudados en algunos casos por otro tipo de maquinarias (ej. palas mecánicas).

Por su parte, la continuidad de la operación de los llamados “Puntos Verdes”, que en su momento fueron sitios diseñados para recibir los descartes de los clasificadores y reducir los impactos de su disposición inadecuada, está siendo actualmente cuestionada debido a que son utilizados de forma

inadecuada para la disposición de residuos de podas y residuos de comercios.

El total de los residuos recolectados por el sistema formal es transportado al SDF de Felipe Cardozo, donde eran recibidos en el orden de 1.300 ton/día de residuos, de acuerdo al PDRS (Tabla I.3). Además, eran conducidos a este SDF aproximadamente 250 ton/día correspondientes a todos los residuos industriales de Montevideo, así como algunos provenientes de Canelones y San José que cumplen los requisitos establecidos para su ingreso.

El predio del SDF de Felipe Cardozo posee una superficie total de 121,3 hás. Este presenta algunas carencias en lo que se refiere al control de los impactos provocados por la generación de lixiviados y emisiones gaseosas, así como en el monitoreo de las condiciones de operación. Sin embargo, en las últimas celdas puestas en operación fueron instaladas membranas de impermeabilización de fondo y un sistema de recolección y tratamiento de lixiviados, así como un sistema de recolección de biogás en dos de las celdas clausuradas.

En cuanto a alternativas de revalorización de residuos, han sido desarrolladas algunas experiencias de recolección selectiva de residuos por

separación en origen. Este es el caso del plan piloto de recolección llevado a cabo en el Municipio CH, en el cual se utilizaban contenedores de color naranja para recibir la fracción seca de residuos reciclables. Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, dadas las bajas tasas de separación alcanzadas y la contaminación de los residuos con otras fracciones.

Continuando en la búsqueda de alternativas, a mediados de Setiembre de 2013 comenzó a operar el Plan “Mi barrio clasifica” en el barrio Pocitos del Municipio CH de Montevideo, en el cual fueron distribuidos en edificios residenciales, escuelas, liceos y oficinas, contenedores específicos para la separación de residuos secos reciclables (papel y cartón, plásticos, metales, etc.) que luego son recolectados y transportados a plantas de clasificación⁴. A través de este plan se pretende reducir el volumen de residuos que ingresa al sistema de contenedores en la acera, además de servir como experiencia respecto a la separación en origen de residuos.

⁴<http://municipioch.montevideo.gub.uy/clasifica>

Figura I.4. Logo del Plan "Mi barrio clasifica" del Municipio CH de Montevideo.

Fuente: <http://municipioch.montevideo.gub.uy/clasifica>



Por otro lado, existen contenedores distribuidos en la ciudad y distintos comercios para la recepción de algunos residuos específicos separados en origen, como son plásticos, vidrios, latas y pilas. La IdeM cuenta con un mapa interactivo con la ubicación de los contenedores para depositar los distintos materiales reciclables⁵. Lamentablemente, estas iniciativas no cuentan con adecuadas campañas de información y concientización de la población, resultando en adhesiones muy bajas.

Actualmente, en el marco del Plan de Gestión de Envases denominado “Tu Envase Sirve”, la IdeM se encuentra en proceso de instalación de 4 plantas

⁵<http://www.montevideo.gub.uy/ciudadania/desarrollo-ambiental/limpieza/contenedores/>

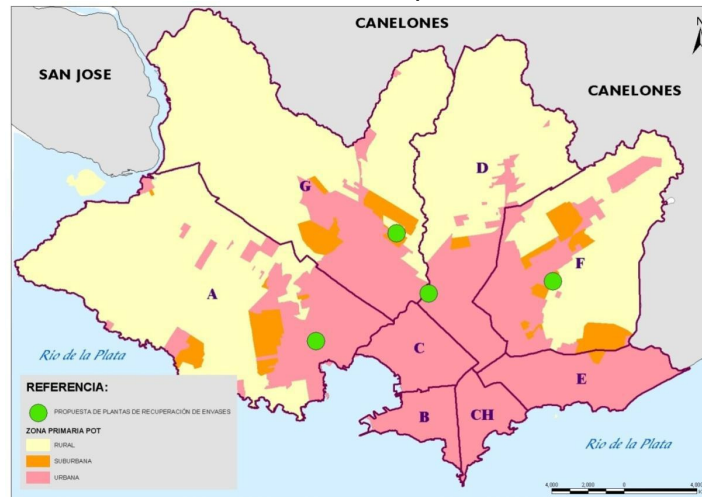
de clasificación de residuos y separación de materiales reciclables, en convenio con el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), el Ministerio de Desarrollo Social (MIDES) y la Cámara de Industrias del Uruguay (CIU). Las mismas son de operación manual y con una capacidad total de 120 ton/día, pudiendo incorporar otras tecnologías automáticas en un futuro y ampliar la capacidad de procesamiento. Sus ubicaciones son en los barrios Cerro, Peñarol, Chacarita de los Padres y en las inmediaciones del Cementerio del Norte. Cada una emplea 32 operarios provenientes de distintas organizaciones de clasificadores, avanzando así en la formalización e inclusión social de dicho sector.

El pasado 24 de marzo de 2014 fue inaugurada la primera planta de clasificación localizada en el barrio La Paloma, del Cerro, la cual recibe los residuos preclasificados en el hogar y depositados en contenedores de tapa naranja ubicados en las grandes superficies comerciales de los municipios A y B⁶.

⁶<http://www.montevideo.gub.uy/ciudadania/campanas/tu-envase-sirve>

Figura I.5. Ubicación de las plantas de clasificación de la Idem.

Fuente: <http://www.montevideo.gub.uy/ciudadania/desarrollo-ambiental/limpieza>



En lo que respecta a la gestión de RSU en el Departamento de Canelones, en los últimos años se ha comenzado a implementar un sistema de recolección mediante contenedores en las localidades mayormente pobladas. Este es el caso de Barros Blancos, Ciudad de la Costa, La Paz, Las Piedras, Pando, Paso Carrasco, Progreso y Toledo. El sistema se basa en contenedores metálicos de 2,4 m³ de capacidad colocados en la acera, mientras que el transporte se realiza en camiones compactadores de carga manual, con una frecuencia media de recolección entre 3 y 4 veces semanales. Sin embargo, en las zonas con menor densidad de población, aún se continúa utilizando el sistema de recolección manual en bolsas y transporte en camiones de caja abierta. A su vez, el servicio puede ser

municipal o estar a cargo de una empresa tercerizada contratada por la Intendencia.

Figura I.6. Contenedores utilizados en el Departamento de Canelones.

Fuente: <http://www.imcanelones.gub.uy/?q=node/7621>



Existen dos SDF en el Departamento de Canelones, Cantera Maritas III y Cañada Grande II, de los cuales sólo el primero se encuentra ubicado dentro del AMM, aunque este se encuentra actualmente en proceso de clausura, construyéndose en su lugar una estación de transferencia. Ninguno de éstos cuenta con balanza, por lo que la cantidad de residuos que ingresan no es adecuadamente registrada, pudiendo hacerse sólo una estimación a partir del número de camiones que ingresan.

Dado que la vida útil de estos SDF ha sido superada ampliamente, sumado al hecho de que no cuentan con sistemas de control de lixiviados y emisiones

gaseosas, provoca numerosos impactos sobre el medio ambiente, lo cual es agravado debido a la cercanía de estos a zonas urbanas y cursos de agua.

Sin embargo, hoy en día la operación del SDF de Cañada Grande II está siendo corregida a través de mejoras de caminería interna, cobertura periódica para reducir olores, evitar vectores y reducir lixiviados, venteo de gases, y desvío de pluviales. Además, el sistema de tratamiento de lixiviados se encuentra en proceso de ampliación.

En el marco de la Ley de Envases, en la Ciudad de la Costa se está llevando a cabo el Programa “Tu envase nos sirve”, el cual es realizado también en otras zonas del país y consiste en la existencia de puntos de entrega voluntaria de residuos reciclables, los cuales son recolectados por diversas organizaciones. Gracias a la difusión que ha tenido el Programa, se han registrado tasas importantes de recuperación de materiales.

Figura I.7. Recolección y acondicionamiento de residuos por el Programa "Tu envase nos sirve".

Fuente: <http://archivo.presidencia.gub.uy/>



Además, en distintas localidades del Departamento de Canelones se ha implementado un sistema de recolección de residuos separados en origen, mediante la distribución de contenedores en complejos de viviendas, escuelas, liceos y otros centros de gran generación de residuos. El servicio de recolección y acondicionamiento de los materiales recuperados está a cargo de trabajadores formalizados provenientes del sector de clasificadores informales.

Las localidades del Departamento de San José que se encuentran dentro del AMM, cuentan mayoritariamente con un sistema de recolección de residuos convencional con almacenamiento en bolsas, recolección manual y transporte en camiones compactadores. Sin embargo, a partir del año 2012

ha comenzado la implementación de un sistema de recolección en base a contenedores similares a los utilizados en Montevideo. Estos contenedores, en principio, se encuentran ubicados principalmente frente a centros de estudio y oficinas públicas, aunque se espera que en un futuro el sistema pueda ser ampliado y lograr una mayor área de cobertura.

Figura I.8. Contenedores y camiones recolectores utilizados en el Departamento de San José.

Fuente: (CSI Ingenieros - Estudio Pittamiglio, 2011)



Existe un SDF en la localidad de Rincón de la Bolsa, el cual fue diseñado para recibir todos los residuos generados correspondientes a las zonas del Departamento de San José ubicadas dentro del AMM. La falta de registros confiables dificulta la estimación de la cantidad de residuos recibidos. Este SDF cuenta con recolección y tratamiento de lixiviados, aunque el monitoreo de las condiciones de operación son escasos.

De acuerdo a los estudios de evaluación ambiental solicitados por la DINAMA (CSI Ingenieros - Estudio Pittamiglio, 2011), de todos los SDF relevados de nuestro país, sólo uno cuenta con las instalaciones adecuadas y opera en forma aceptable; y otros dos operan en condiciones controladas. El resto de los SDF presentan condiciones inadecuadas de funcionamiento, mostrando problemas en la operativa y diversos impactos ambientales significativos asociados.

Entre los principales aspectos e impactos ambientales asociados a los SDF se pueden mencionar la contaminación de cuerpos de agua superficial y subterránea provocada por la falta de tratamiento de los lixiviados, la emisión olores molestos y otros gases, la proliferación de vectores transmisores de enfermedades, la voladura y arrastre de residuos fuera del SDF, y la presencia de tránsito pesado causante del deterioro de las infraestructura vial.

Además, las emisiones de metano desde los SDF, producto de la descomposición anaerobia de los residuos contribuyen de forma muy significativa al inventario de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). De acuerdo al último inventario de emisiones de GEI en nuestro país, las emisiones asociadas a los SDF explican el 6,1 % de las emisiones totales de metano (MVOTMA-DINAMA-Unidad de Cambio Climático, 2006).

Por último, la presencia de clasificadores dentro del SDF, además de causar dificultades en la operación normal, representa un aspecto de gran importancia desde el punto de vista del riesgo sanitario.

Figura I.9. Vistas de algunos de los SDF del AMM.

Fuente: (FICHTNER-LKSur, 2004)



I.6 Aspectos económicos de la gestión

Más allá de que en el presente estudio no se realiza la evaluación económica en la comparación de los sistemas alternativos de gestión de RSU planteados, es deseable contar con una aproximación a los datos generales

de mayor relevancia relacionados a los costos de gestión, de forma de contar con otro criterio de evaluación de los sistemas propuestos.

Según se indica en los estudios realizados (FICHTNER-LKSur, 2004), la recaudación de los gobiernos municipales provenientes de los impuestos asociados al manejo de residuos, no logra cubrir los gastos que estos tienen en su gestión. Por esta razón, la gestión de RSU debe ser financiada por otros ingresos generales, lo que dificulta la autonomía y capacidad de desarrollo de los departamentos de limpieza de las Intendencias.

En la Tabla II.8 se detallan los costos por tonelada asociados a la recolección y disposición de RSDPG en el AMM, incluyendo todos los servicios prestados por el sector formal. Dado que los costos de la gestión de los RSGG son asumidos por los propios generadores, éstos no son considerados en el análisis.

Tabla I.8. Costo de la gestión de RSDPG en el AMM (U\$S/ton).

Fuente: (Themelis - Díaz, 2012)

Departamento	Recolección y transporte	Disposición final	Total
Montevideo	128	15	143
Canelones	93	9	102
San José	75	25	100
Promedio	122	14	136

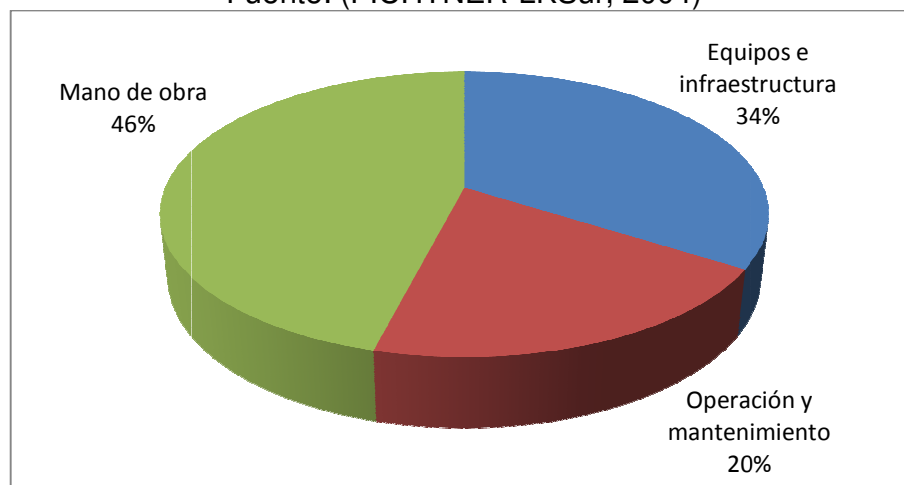
Como se puede observar, los costos de la gestión de RSU en Montevideo son sensiblemente mayores a los de Canelones y San José, lo cual puede deberse a la mayor superficie cubierta por los servicios de recolección y a mejores retribuciones salariales por la mano de obra.

Un aspecto de gran importancia que cabe destacar es el hecho que el costo derivado de la recolección y transporte representa casi el 90 % del costo total de la gestión. Por lo tanto, todas las acciones que puedan adoptarse para optimizar esta operación serían reflejadas notoriamente en los costos totales de la gestión.

En el siguiente gráfico se muestran los costos diferenciados de la recolección y transporte para el Departamento de Montevideo. En ésta se observa el importante peso que posee la mano de obra, la cual implica el 46 % de los costos de recolección y transporte.

Gráfico I.1. Estructura de costos de la recolección y transporte de RSDPG en Montevideo, año 2004.

Fuente: (FICHTNER-LKSur, 2004)



De acuerdo a datos proporcionados por representantes de la División Limpieza de la IdeM⁷, los costos totales de operación y mantenimiento del sistema de recolección se estiman en aproximadamente en U\$S 10.200.000 anuales, de los cuales el 35 % corresponde al consumo de combustible. Esto equivale a un consumo aproximado de 1.980.000 L/año de gas oil en todos los servicios de la División Limpieza.

Lamentablemente no se cuenta con los datos discriminados de consumo de combustible según los distintos servicios de recolección, ni con datos específicos relativos a la cantidad de residuos recolectados.

⁷ Entrevista realizada a la Ec. Leticia Beledo de la División Limpieza de la IdeM (16/10/2012).

I.7 Sector informal

Se denomina clasificadores informales de residuos a aquellas personas que recolectan RSU por fuera de los circuitos formales de recolección, los trasladan y los clasifican para obtener materiales útiles que son comercializados en el mercado de materiales reciclables.

La actividad del sector informal de recolección y clasificación de RSU se presenta principalmente en la Ciudad de Montevideo, siendo muy menor en los Departamentos de Canelones y San José. Sin embargo, ha sido constatada la existencia de clasificadores que recolectan residuos en Montevideo para luego trasladarlos hacia otras zonas del AMM para su clasificación y comercialización.

Existen diversas causas para la existencia de un sector informal de clasificadores de residuos. La situación económica y el aumento del desempleo durante las crisis sufridas en nuestro país, han provocado el incremento de esta actividad como la única forma subsistencia para un número importante de personas. A su vez, existen aspectos culturales asociados a las actividades de clasificación que se encuentran muy arraigadas en este sector de la población y que son transmitidas entre

generaciones, lo que sumado a la falta de capacitación para realizar otro tipo de tareas, dificulta su ingreso al sistema laboral formal.

De acuerdo a datos de la División Limpieza del Departamento de Desarrollo Ambiental de la IdeM, el registro de la población de clasificadores informales se compone de 5.279 personas en el período 2008 – 2010 (Intendencia de Montevideo - PNUD/PNUMA, 2012).

La cantidad y tipo de residuos que son recolectados por el sector informal depende en forma muy importante de la situación del mercado de los materiales reciclables, el cual presenta una dinámica muy fluctuante. Los materiales recuperados son, en su mayoría, vendidos a empresas intermediarias que los recolectan, los acondicionan y los venden a industrias de reciclaje (ver I.8 Mercado de materiales reciclables).

De acuerdo a datos del PDRS (FICHTNER-LKSur, 2004), la cantidad total determinada de residuos recolectados por el sector informal en el AMM era de 737 ton/día, representando el 38 % del total de los RSU generados. De estos, solo 417 ton/día correspondían a materiales finalmente recuperados, por lo que la tasa de recuperación de materiales por el sector informal se podía estimar en 57 % respecto al total recolectado. En cuanto a los descartes generados en la clasificación, que fueron estimados en

aproximadamente 320 ton/día, solo el 69 % eran retornados al circuito formal de recolección, mientras el restante 31 % era dispuesto en forma inadecuada en basurales y quemas clandestinas.

La mayoría de los clasificadores trabaja recolectando residuos de la calle y del sistema de contenedores, mientras que solo algunos operan en el SDF. En algunos casos, los clasificadores poseen recorridos estables y “clientes” fijos (comercios o edificios) que les reservan los residuos generados.

La implementación del sistema de contenedores ha permitido que se realice una primera clasificación dentro de éstos, en donde permanecen los materiales no aprovechables. Sin embargo, muchas veces la propia tarea de clasificación provoca la diseminación de residuos en torno al contenedor, causando riesgos para la salud de la población y una muy mala imagen de la ciudad.

Los residuos recolectados son trasladados por medio de carros impulsados manualmente, en bicicleta o a caballo, hacia el hogar de los clasificadores, donde se realiza una segunda clasificación en la que también participan mujeres y niños. Los materiales sin valor comercial son descartados, no siempre de la forma más adecuada, mientras que los materiales reciclables

son acondicionados y comercializados generalmente a depósitos intermediarios de la industria del reciclaje.

Entre los aspectos positivos de la clasificación informal de RSU, que muchas veces pasan desapercibidos, corresponde mencionar el hecho de que esta actividad es la principal vía que existe actualmente de recuperación de residuos. De otra forma, estos residuos terminarían en los SDF sin posibilidad de revalorización, aumentando los costos de la gestión y reduciendo la vida útil de los SDF. Además, esta actividad representa el principal ingreso económico de estas familias en situación de extrema pobreza, que a su vez alimenta la cadena del reciclaje de materiales, generando empleos en la industria e intermediarios.

Sin embargo, las condiciones insalubres en que los clasificadores y sus familias efectúan el trabajo de clasificación en sus hogares, el trabajo infantil en el manejo de residuos, la alimentación de animales con residuos orgánicos, entre otros, significan aspectos negativos de gran impacto que deben ser erradicados.

La disposición inadecuada de los descartes ha generado un gran número de basurales endémicos, muchos de los cuales se encuentran en las márgenes de los cursos de agua. Entre los impactos ambientales de mayor significancia

asociados a la presencia de estos basurales, se pueden mencionar la proliferación de vectores transmisores de enfermedades, la generación de olores molestos, la contaminación de cuerpos de agua, y la afectación hidráulica de arroyos, cañadas y del sistema de saneamiento. Además, las tareas de limpieza llevadas a cabo por la intendencia para remediar esta situación, provoca un aumento en los gastos de la gestión de RSU.

Por otro lado, la quema clandestina de los descartes es una práctica común realizada por los clasificadores, que libera agentes tóxicos al ambiente, que pueden ser muy perjudiciales para la propia familia de clasificadores como para sus vecinos.

Para dar solución a estos problemas, la Idem ha implementado los llamados “Puntos Verdes”, los cuales se ubican en distintas zonas de la ciudad y donde los clasificadores pueden llevar los descartes para su retorno al circuito formal de recolección. Sin embargo, la continuidad de la operación de estos puntos está siendo actualmente evaluada, ya que los mismos son utilizados para la disposición de restos de podas, escombros y otro tipo de residuos, así como para la propia actividad de los clasificadores, no cumpliendo los objetivos para los cuales fueron diseñados.

Si bien la mayoría de los clasificadores informales trabaja en forma aislada y autónoma, existen agrupaciones de clasificadores, como es la Unión de Clasificadores de Residuos Urbanos Sólidos (UCRUS), que son apoyadas en aspectos técnicos por el PIT-CNT, la IdeM, Extensión Universitaria y algunas ONGs.

Entre estas últimas, cabe destacar a la Organización San Vicente, la cual posee una larga trayectoria de trabajo en el desarrollo social de la población en contextos críticos y promoción de diversas actividades con los clasificadores. El principal objetivo de estas iniciativas es la mejora de las condiciones de trabajo de los clasificadores, brindando capacitación, infraestructura y otras necesidades que estos presentan para llevar a cabo esta actividad con el mínimo riesgo para los trabajadores y el resto de la población. Además, de esta manera se realiza el reconocimiento sobre la importancia de esta actividad, promoviendo no solo la inserción de los clasificadores dentro de la sociedad, sino también el involucramiento y concientización del resto de la población en las tareas relativas al manejo de residuos.

Respecto a los aspectos socioculturales que distinguen a los clasificadores, éstos en general están identificados con el sector marginal de la población que reside en las periferias de la ciudad, poseen una imagen desvalorizada y

una calidad de vida muy precaria. En el año 2012 fue realizado por la IdeM un informe sobre la caracterización de la población de clasificadores en Montevideo (Intendencia de Montevideo - PNUD/PNUMA, 2012) con el objetivo de comprender los condicionamientos de la actividad de este sector e inducir a la toma de decisiones orientadas a cortar los mecanismos de reproducción de esta actividad y las pautas culturales asociadas.

De acuerdo a los datos relevados, el grupo de hogares de clasificadores está conformado por un 53 % de hombres, presentando una leve diferencia respecto al resto de Montevideo. En relación a la distribución etaria, aproximadamente el 90 % de la población es menor a 50 años, siendo el 65 % menor a 30 años.

En cuanto a la educación, condición que se considera determinante para la inserción social de dicha población, el informe indica que el 36 % de las personas entre 15 y 65 años tiene primaria incompleta, aunque se observa una disminución de la cantidad de personas con primaria incompleta en la franja etaria más joven.

La comprensión de la dinámica laboral del sector de clasificadores es de gran importancia en la búsqueda de mecanismos de integración. Sólo el 22 % de los clasificadores son asalariados por otras tareas realizadas, mientras

que el resto trabaja de forma independiente. Además, aproximadamente el 83 % no realiza aporte jubilatorios, lo que refleja un alto nivel de informalidad en las tareas que realizan.

El análisis de las características de las viviendas permite reconocer la situación de exclusión social y territorial de los hogares de clasificadores. Un alto porcentaje de los hogares se encuentran próximos a por lo menos un sitio potencialmente contaminado (industrias, basurales, suelos con plomo, etc.). Por otro lado, más del 60 % de las viviendas presenta al menos una necesidad básica insatisfecha reflejando carencias edilicias y de habitabilidad, siendo la accesibilidad al agua y la evacuación de excretas las más importantes.

La situación de pobreza y exclusión social se vinculan estrechamente con los aspectos ambientales relacionados con su hábitat y las condiciones laborales. Las situaciones de precariedad e informalidad laboral, la baja accesibilidad a la educación formal y a las políticas sociales, la segregación socio-urbana a zonas periféricas deficitarias en higiene y seguridad, son factores comunes en la mayoría de las personas dedicadas a la recolección y clasificación de residuos informalmente.

I.8 Mercado de materiales reciclables

I.8.1 Introducción

En la presente sección se describen las principales características de los mercados de reciclaje de las distintas fracciones de materiales contenidas en los RSU, cuya información se basa principalmente en distintos informes existentes (FICHTNER-LKSur, 2004; Barrenechea, 2003), así como mediante entrevistas realizadas a los actores clave del sector⁸. Se incluyen también algunas consideraciones en relación a los procesos de reciclaje de cada material, aunque éstos son detallados más adelante (ver II.6 Reciclaje).

Las actividades de reciclaje en el AMM se llevan a cabo mediante programas voluntarios de reciclaje, por grandes generadores que realizan separación selectiva y envían directamente los materiales a reciclar, y a través de la actividad de los clasificadores informales.

En una primera etapa, los materiales son recolectados, acondicionados y almacenados en depósitos, para ser luego enviados a las industrias de reciclaje tanto nacionales como extranjeras.

⁸ Entrevista con la Ing. María José González de CEMPRE Uruguay (Compromiso Empresarial para el Reciclaje) llevada a cabo el día 19/09/2012.

Los principales materiales que son reciclados en el AMM son:

- Papel y cartón
- Plásticos
- Vidrio
- Metales ferrosos
- Metales no ferrosos

Como ya fue mencionado, el mercado de los materiales reciclables tiene una importante dependencia con la actividad del sector informal, mientras que los programas formales de reciclaje responden a iniciativas particulares careciendo en general de una planificación a nivel de las instituciones. En la Tabla II.5 se muestran las cantidades de materiales recuperados por el sector informal de acuerdo a datos presentes en el PDRS correspondientes al año 2003.

En cuanto a las iniciativas formales de recuperación y reciclaje, existen diversos programas dedicados a la recolección de materiales, los cuales se muestran en la siguiente tabla, junto a las cantidades manejadas según datos del PDRS para el año 2003.

Tabla I.9. Programas formales de recuperación de materiales.

Fuente: (FICHTNER-LKSur, 2004)

Programa	Material recuperado	Cantidad manejada (ton/año)
TRANSFORECO	Plásticos PET	2.485
CONAPROLE	Bolsas de leche	23
PROLATA	Latas de aluminio	4
REPAPEL	Papel	70
J.C. DECAUX	Envases plásticos, vidrio y latas de aluminio	818
Otras iniciativas		30
Total		3.431

Cabe destacar la tarea de CEMPRES Uruguay (Compromiso Empresarial para el Reciclaje), la cual es una asociación civil sin fines de lucro y cuyo objetivo es la promoción de la reducción y el reciclaje de residuos, a través del apoyo técnico a empresas del sector público y privado, y a diversas organizaciones que se desempeñan en el área de los residuos sólidos.

I.8.2 Papel y cartón

El reciclaje del papel y cartón depende en gran medida del producto final que se desee elaborar y del material a procesar, siendo impracticable si se quiere fabricar papel de alta calidad. El papel y cartón para reciclaje puede clasificarse en papel de diario, cartón, papel de alta calidad y papel mezclado o de tercera.

El mercado se divide aproximadamente en partes iguales entre papel y cartón, y en general se puede decir que la calidad de los materiales recolectados es relativamente buena.

En la actualidad existen dos grandes depósitos que reciben estos materiales de depósitos pequeños o directamente de los clasificadores, los acondicionan y los comercializan a fábricas de papel o eventualmente lo exportan. Éstos son Depósito Pedernal⁹ y Rotondaro¹⁰, los cuales abarcan el 75 % del total del mercado. Entre las fábricas de papel, se destacan Ipusa y Pamer, las cuales utilizan 80 % de papel reciclado como materia prima, para la fabricación de cartón corrugado, cartón gris y papel tissue.

Uno de los programas formales existentes en la actualidad es REPAPPEL, la cual es una organización civil dedicada a la promoción de los sistemas de gestión de residuos de papel a través de la clasificación en origen en escuelas, organismos públicos y empresas privadas. De acuerdo a los datos presentados en el informe anual del 2011 de los resultados obtenidos en las distintas actividades de REPAPPEL, se declara la recuperación de poco más

⁹<http://depositopedernal.com.uy/>

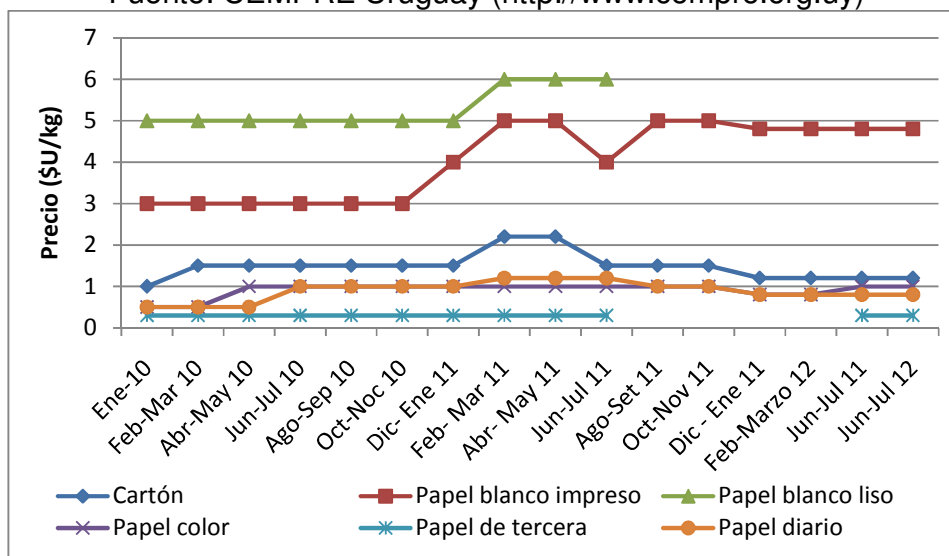
¹⁰<http://rotondaro.com.uy/blog/es>

de 400 ton, lo que representa un aumento del 30 % respecto al 2009 y del 900 % respecto al 2003¹¹.

En el siguiente gráfico se muestra la evolución del precio de los principales tipos de papel y cartón en el mercado del reciclaje para los últimos años, donde se observa la existencia de un aumento a fines del 2010 para luego mantenerse relativamente constante.

Gráfico I.2. Evolución del precio del papel en el mercado de materiales reciclables.

Fuente: CEMPRES Uruguay (<http://www.cempre.org.uy>)



¹¹<http://www.repapel.org/>

I.8.3 Plásticos

Los productos plásticos pueden clasificarse de acuerdo a las resinas utilizadas en su fabricación, definiendo un código numérico para su identificación.

Figura I.10. Clasificación de plásticos.



La gran diversidad de estos materiales dificulta el proceso de reciclaje, requiriéndose una adecuada separación de las distintas fracciones. Además, la contaminación con otros materiales, como son el papel, restos orgánicos, metales, etc., puede afectar negativamente la calidad de los productos finales y consecuentemente el precio que se paga por los materiales recolectados.

De los distintos tipos de plásticos, el PET es el que posee un mayor mercado y mayor cantidad de emprendimientos asociados a su recolección y reciclaje,

entre los cuales se destaca Transforeco, la cual recolecta en el entorno de 2.500 ton/año de PET que sirven de materia prima en las fábricas de reciclaje. En Uruguay existen dos fábricas de productos de PET que utilizan materiales reciclados como materia virgen: Ecopet y Universal Plastic.

Ecopet está dedicada al reciclaje de productos de PET para la fabricación de escamas, que en su gran mayoría es exportada a la región (Brasil, Argentina y Chile) y fuera de ella (EEUU, España y China). Las principales aplicaciones de estos productos son la industria textil, la fabricación de pinturas y material de empaque¹².

Por su parte, Universal Plastic fabrica escamas de PET a partir de envases post consumo, así como láminas y pellets de distintas calidades¹³.

Cabe mencionar la existencia en nuestro país de la empresa Cristalpet, compuesta por el Grupo Cristalerías y Ecopet, dedicada principalmente a la fabricación de preformas y botellas de PET a partir de materia virgen, siendo la mayor proveedora de este tipo de envases al mercado local y consolidando exportaciones al Mercosur y otros mercados internacionales¹⁴.

¹²<http://ecopet.net/2008/home.html>

¹³<http://www.universalplastic.com.uy/>

¹⁴<http://www.cristalpet.com.uy/>

Por otro lado, se encuentra la empresa Los Tornos (Plásticos Garré) ubicada en el Polo Tecnológico Industrial (PTI) del Cerro, que recicla bolsas de PEBD para la fabricación de pellets clasificados por color.

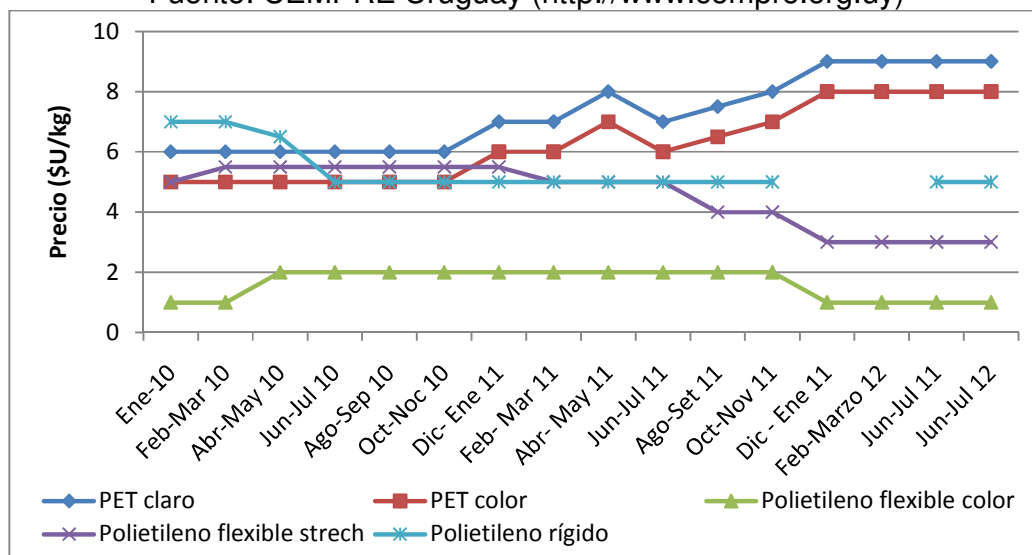
Debido a la relativamente fácil implementación y operación de las plantas procesadoras de plástico para su reciclaje, existen en la actualidad numerosos emprendimientos semi-formales con características de PYMEs que reciclan las distintas fracciones de plásticos, en especial PEAD, PP y PVC. Estas producen pellets para la fabricación de bolsas negras de residuos, baldes, caños, etc.

En la actualidad, no existe capacidad en nuestro país para el reciclaje de PS, por lo que este material es descartado en su totalidad.

En el siguiente gráfico se muestra la evolución del precio del plástico en el mercado del reciclaje, donde se observa un importante aumento del precio del PET desde agosto del 2011 y un descenso del precio del polietileno stretch y flexible.

Gráfico I.3. Evolución del precio del plástico en el mercado de materiales reciclables.

Fuente: CEMPRES Uruguay (<http://www.cempre.org.uy>)



Un factor de gran importancia, es el hecho de que el precio de los plásticos depende en gran medida del precio del petróleo, por lo tanto se trata de un mercado muy variable que puede afectar la sostenibilidad de los emprendimientos asociados.

I.8.4 Vidrio

El mercado de reciclaje de vidrio consiste en la utilización de vidrio roto o de descarte como materia prima en la fabricación de nuevos materiales. Por otro lado se encuentra la reutilización de botellas y envases luego de una adecuada limpieza e higienización, aunque ésta no corresponde a un proceso de reciclaje, sino justamente a reuso.

Por otra parte, existen algunos materiales de vidrio que por su composición no son reciclables, entre los cuales se pueden mencionar los vidrios de vajillas domésticas, vidrio plano, vidrios cristales, vidrio de laboratorio, etc.

El vidrio puede ser reciclable infinitas veces y se utiliza vidrio en trozos para reducir la temperatura de fusión del horno en la fabricación de vidrio a partir de materia prima virgen. De esta manera, su reciclaje presenta diversas ventajas y beneficios ambientales; como son la conservación de recursos naturales, la reducción del consumo de energía y la reducción de la generación de residuos en el proceso de fabricación.

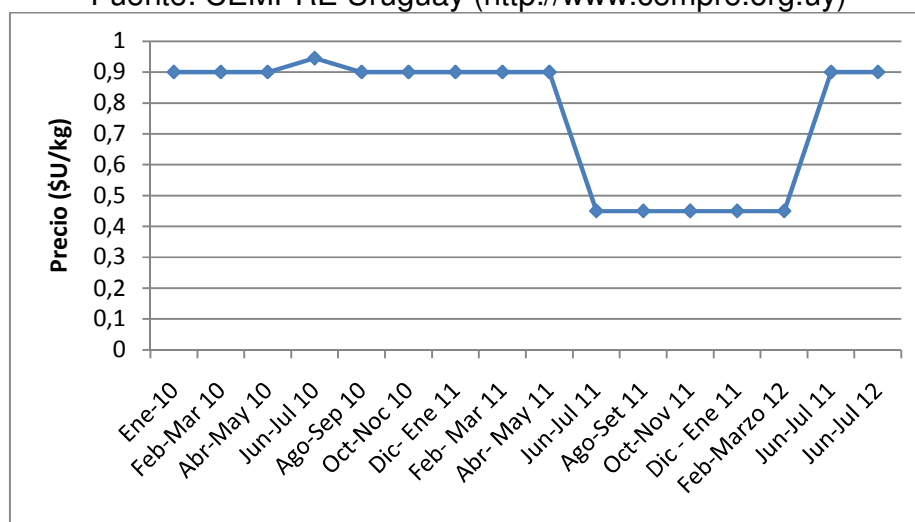
En contraste, el hecho de que algunos de los envases recuperados no se encuentren vacíos o presenten otros contaminantes, así como la mezcla de distintos colores de vidrio, puede disminuir considerablemente el precio a pagar por estos materiales y dificultar el proceso de reciclaje.

En nuestro país, el reciclaje de vidrio sufrió una importante disminución al cerrarse en el año 1999 la empresa Cristalerías del Uruguay, la única fábrica de vidrio del país. En el año 2008, ex trabajadores de Cristalerías formaron la cooperativa ENVIDRIO y se instalan en el PTI del Cerro, permitiendo un nuevo desarrollo del mercado del reciclaje del vidrio, aunque en menor medida.

En el siguiente gráfico se muestra a la evolución del precio del vidrio en el mercado del reciclaje.

Gráfico I.4. Evolución del precio del vidrio en el mercado de materiales reciclables.

Fuente: CEMPRE Uruguay (<http://www.cempre.org.uy>)



I.8.5 Metales ferrosos

Los metales ferrosos pueden ser clasificados en el mercado de reciclaje en dos categorías. Por un lado se encuentra el hierro dulce, como las chapas, latas, perfiles barras, caños, partes de chasis, etc., que a su vez pueden dividirse según su espesor en liviano, medio y pesado; y por otro el hierro fundido, como los bloques de motores y distintas maquinarias.

El reciclaje del hierro consiste simplemente en su fundición para poder ser forjado nuevamente, aunque muchas veces es necesaria una etapa previa

de acondicionamiento y eliminación de contaminantes. En el procesamiento de algunos materiales se requiere además la separación del estaño, lo cual puede realizarse mediante métodos electrolíticos. El proceso de reciclaje puede repetirse infinitas veces, sin perder las características del producto final elaborado.

Entre los beneficios del reciclaje de metales ferrosos, se pueden mencionar la importante reducción del consumo de energía y el ahorro del consumo de materiales vírgenes.

En nuestro país, el reciclaje de metales ferrosos está liderado por una sola empresa que recicla el 100 % de la chatarra recolectada y utiliza ésta como única materia prima. Se trata de la empresa Gerdau dedicada a la producción de diversos productos de acero y se compone actualmente de capitales brasileños¹⁵.

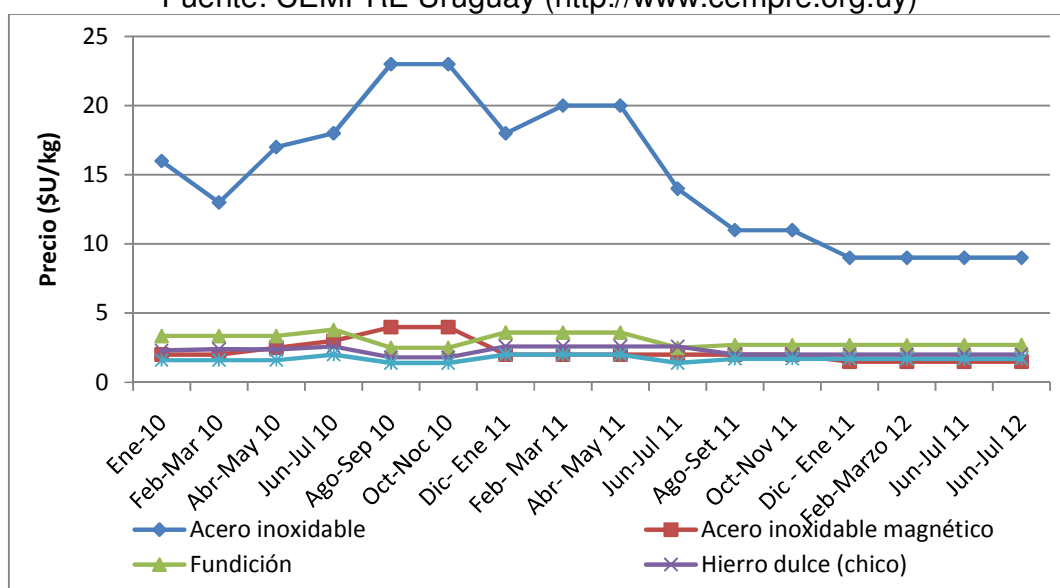
La empresa Gerdau se alimenta principalmente de la chatarra proveniente directamente de distintas industrias y aquella recolectada en los más de 50 depósitos intermedios existentes. Los depósitos reciben estos materiales de distintas fuentes, entre los que se encuentran los clasificadores informales, y los acondicionan para comercializarlos a la empresa que los procesa.

¹⁵http://www.gerdau.com.uy/index_1.html

En el siguiente gráfico se muestra la evolución del precio de los metales ferrosos en el mercado del reciclaje, donde se observa que cierta fluctuación de los precios a lo largo del tiempo. También se observa que el acero inoxidable presenta un precio considerablemente superior en comparación al resto de los metales ferrosos, más allá de una importante caída en el último tiempo.

Gráfico I.5. Evolución del precio de los metales ferrosos en el mercado de materiales reciclables.

Fuente: CEMPRE Uruguay (<http://www.cempre.org.uy>)



I.8.6 Aluminio

El aluminio es el metal no ferroso de mayor relevancia en el mercado de materiales reciclables, ya que existe una elevada demanda externa para este material.

El reciclaje del aluminio es técnica, económica y ambientalmente viable, y consiste en la separación de los distintos metales y su posterior fundición. Los principales beneficios del reciclaje del aluminio son el ahorro en el consumo de energía y en el uso de materiales vírgenes.

En Uruguay se lleva adelante el Programa de Recuperación de Latas (PROLATA), el cual es una iniciativa del Centro Uruguay Independiente (CUI) con el apoyo de la IdEM, y cuyo objetivo es la recuperación para reuso o reciclaje de cualquier tipo de latas, principalmente de aluminio. El material recolectado es principalmente exportado a Brasil para su reprocesamiento y producción de nuevas latas.

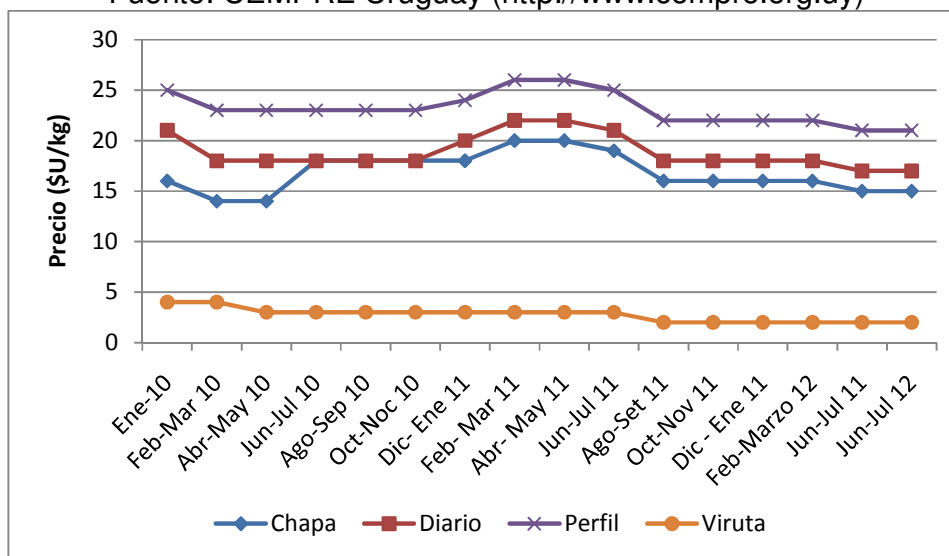
Por otro lado, existen dos empresas principales dedicadas a la fabricación de distintos artículos de aluminio para el área de la construcción, Aluminios del

Uruguay¹⁶ y Alumex¹⁷, las cuales también reciben residuos de aluminio a través de depósitos intermedios o de los propios clasificadores.

A continuación se muestra la evolución del precio del aluminio en el mercado del reciclaje. Se puede observar que el aluminio presenta mejores precios, comparado con el hierro, lo que se traduce en un mercado muy atractivo para la comercialización de estos productos.

Gráfico I.6. Evolución del precio del aluminio en el mercado de materiales reciclables.

Fuente: CEMPRE Uruguay (<http://www.cempre.org.uy>)



¹⁶<http://www.aluminios.com/>

¹⁷<http://www.alumex.com.uy/>

I.8.7 Cobre

Los destinos principales de la comercialización de estos residuos son la exportación como chatarra y la producción de plaguicidas cúpricos en el medio local. Además, dadas las características de estos materiales, parte de los materiales de cobre recolectados por los clasificadores son vendidos en ferias vecinales en lugar de comercializarlos a depósitos.

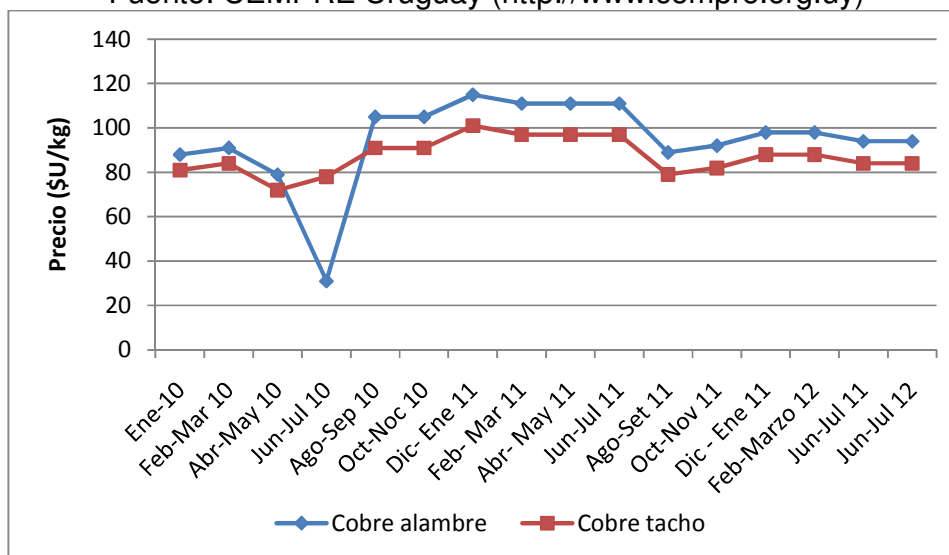
Entre los principales actores en este mercado, se puede mencionar a la empresa Werba, la cual se dedica al reciclaje de distintos metales no ferrosos, entre los que se destaca el cobre. El proceso que se lleva a cabo consiste en la separación y compactación de los distintos metales, que luego son fundidos y comercializados como lingotes o granulados a industrias manufactureras nacionales o extranjeras¹⁸.

Por otro lado, el mercado del cobre se encuentra muchas veces asociado a actividades ilegales de robo de cables para la obtención de este metal a través de la quema a cielo abierto para la eliminación del plástico aislante, significando de esta forma una actividad de gran impacto ambiental. Esto se debe a los muy elevados precios de estos materiales, como se puede observar en el siguiente gráfico.

¹⁸<http://www.werbasa.com/>

Gráfico I.7. Evolución del precio del cobre en el mercado de materiales reciclables.

Fuente: CEMPRES Uruguay (<http://www.cempre.org.uy>)



I.9 Política energética nacional y su relación con los RSU

Los aspectos energéticos asociados a distintas corrientes de residuos sólidos, y especialmente a RSU, ha estado en la agenda política de nuestro país de un tiempo a esta parte.

La Política Energética elaborada por la Dirección Nacional de Energía (DNE) del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) fue aprobada en el año 2008 por el Poder Ejecutivo con el consenso de todos los sectores políticos

de nuestro país¹⁹. En ésta se establecen los lineamientos estratégicos definidos por los ejes conceptuales necesarios para el desarrollo en materia energética del país. A su vez, se especifican las metas a corto, mediano y largo plazo, así como las líneas de acción concretas para alcanzarlas.

Dentro del eje de la oferta, la política hace especial énfasis en la diversificación de la matriz energética, tanto de fuentes como de proveedores, con el fin de reducir costos y disminuir la dependencia del petróleo. Uno de los objetivos particulares en este sentido corresponde a la necesidad de impulsar fuentes autóctonas de energía renovables, en el cual se menciona específicamente el uso de ciertas corrientes de residuos.

Como meta a corto plazo, la política energética plantea que al menos el 30 % de residuos agroindustriales y urbanos del país sean utilizados para la generación energética. A mediano plazo se espera alcanzar el 50 % de la matriz energética a partir de fuentes autóctonas y renovables, y contar con las capacidades necesarias para la utilización de residuos con este fin.

En este marco, el MVOTMA a través de la DINAMA ha propuesto la elaboración de un estudio de prefactibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de generación de energía eléctrica y su exportación

¹⁹<http://www.dne.gub.uy/documents/49872/0/Pol%C3%ADtica%20energ%C3%A9tica%202005-2030?version=1.0&t=1378917147456>

a la red, a partir de RSU en el AMM (Themelis - Diaz, 2012). En este informe se evalúan las posibles tecnologías para su implementación, así como un análisis económico y de localización de cada propuesta, de forma de contribuir a al proceso de toma de decisiones.

Por otro lado, la Presidencia de la República ha conformado un equipo de trabajo, el cual articula con otras dependencias del Estado, como son el Congreso de Intendentes, la DNE, la DINAMA, y UTE, con el fin de profundizar el estudio de las alternativas de valorización energética de residuos en todo el país. Para ello se han llevado a cabo distintas investigaciones de caracterización de los residuos generados en diferentes regiones del Uruguay, de forma de poder contar con información confiable a partir de la cual se desarrolle el proceso de toma de decisiones. Además, se ha llevado a cabo la instrumentación de un Data Room, en el cual se ha realizado el intercambio con un grupo de empresas privadas con experiencias en este tema (González *et al*, 2013).

I.10 Residuos sólidos industriales

Si bien el presente trabajo se basa en la gestión de RSU y no se abarcan otras corrientes de residuos, el desarrollo de un modelo de gestión sustentable debería tener una visión integral de todo el sistema y de todos

los residuos generados que puedan ser incluidos en las alternativas propuestas. Por esta razón, en esta sección se mencionan las principales características de los Residuos Sólidos Industriales (RSI) que corresponderían ser incluidas en un sistema real de gestión.

De acuerdo a información proporcionada por la DINAMA (Themelis - Díaz, 2012), en el año 2009 se dispusieron en el relleno de Felipe Cardozo un total de 84.454 ton de RSI, cuya composición y cantidades absolutas generadas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla I.10. Generación de RSI según medidas en SDF.

Fuente: (Themelis - Díaz, 2012)

Tipo de residuo	Porcentaje	Cantidad
	(%)	(ton/año)
Asimilables a urbanos	21,4	18.075
Aserrín con hidrocarburos	23,5	19.817
Lodos	12,3	10.421
Cuero	5,3	4.446
Residuos de construcción	4,1	3.501
Residuos sanitarios	4,0	3.409
Escoria	3,9	3.285
Grasa	2,6	2.187
Alimentos	2,3	1.925
Pelo animal	2,0	1.662
Otros	18,6	15.726
Total	100,0	84.454

Como se observa, el sector industrial genera 18.075 ton/año de residuos asimilables a RSU, a los cuales se puede asignar una composición similar a la indicada en la Tabla I.4.

Por otro lado, se generan 19.817 ton/año de aserrín con hidrocarburos, presumiblemente como producto de la limpieza de derrames. Debido a su elevado poder calorífico, estos residuos pueden ser tenidos en cuenta particularmente en aquellos sistemas que consideren la recuperación energética por incineración como una de las operaciones unitarias.

La categoría de lodos se refiere principalmente a aquellos generados en las plantas de tratamiento de efluentes líquidos u otros residuos de naturaleza predominantemente orgánica y alto contenido de humedad. Gran parte de estos lodos provienen de establecimientos de procesamiento de cueros, por lo que una fracción de estos pueden ser considerados como residuos peligrosos, dadas sus características, y su manejo debería considerarse separadamente al resto de los residuos.

Luego se encuentran los residuos de cuero, de construcción, sanitarios y escorias, que por sus características solo pueden ser considerados en la disposición final en relleno sanitario o de seguridad.

Por otro lado, existen otros tipos de residuos, como son las grasas, alimentos y pelo animal, que pueden representar una alternativa atractiva para ser incluidos en los sistemas que incorporen operaciones de tratamiento biológico, aunque también pueden ingresar a los sistemas de recuperación energética, si el contenido de humedad no es excesivo.

ANEXO II: DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS UNITARIOS

II.1 Introducción

En la sección a continuación se describen los procesos unitarios que conforman los sistemas de gestión propuestos. Se presenta así la información complementaria a la recopilación de los datos necesarios para el desarrollo del modelo de obtención del ICV (ver 5 DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS UNITARIOS).

No se encuentra dentro de los objetivos del presente trabajo realizar un estudio en profundidad de cada una de las tecnologías posibles de tratamiento y disposición de RSU, sino la descripción suficientemente detallada de forma de poder determinar los distintos factores que definen su desempeño desde el punto de vista del consumo de insumos y liberación de contaminantes al ambiente.

La selección de las alternativas planteadas se basa en los antecedentes existentes a nivel local en relación a aquellas tecnologías que han sido estudiadas por organismos gubernamentales, así como por referencias internacionales respecto a las mejores alternativas posibles para los procesos planteados.

Los datos utilizados para describir el desempeño de las distintas operaciones, fueron determinados tras recopilar, contrastar y validar para cada caso la información proveniente de distintas fuentes.

II.2 Separación en origen

La separación en origen se refiere a la clasificación en la fuente generadora de los distintos materiales que componen los residuos, permitiendo que éstos ingresen a circuitos específicos de recolección para su posterior recuperación y revalorización. Como ya fue mencionado, en el presente trabajo sólo se considera la separación de la fracción seca con destino la industria del reciclaje, y de la fracción húmeda para el tratamiento biológico.

Si bien la separación en origen se encuentra fuera de los límites de los sistemas de gestión a analizar, esta clasificación inicial determina los flujos de residuos desviados hacia cada una de las alternativas de tratamiento y disposición, así como la viabilidad técnica y económica del sistema de gestión propuesto.

En el presente estudio se adoptan diferentes tasas de separación en origen de acuerdo al escenario bajo análisis, las cuales fueron definidas anteriormente (ver 4.4 Definición de los sistemas de gestión a estudiar).

Existen diversos métodos para implementar sistemas de separación en origen y alcanzar tasas de recuperación de materiales que contribuyan a la sostenibilidad del sistema. Entre éstos se destacan los programas voluntarios y los sistemas obligatorios. Los primeros consisten en ofrecer las facilidades para que los generadores de residuos trasladen los materiales clasificados a puntos de recepción, lo cual requiere de un sistema suficientemente amplio y distribuido. En cuanto a los sistemas obligatorios, en éstos se exige la separación de algunos de los materiales, limitando la cantidad de residuos no clasificados (fracción mixta) que se pueden desechar sin brindar otro tipo de sistema alternativo, lo cual requiere contar con una capacidad de control adecuada para evitar la disposición inadecuada de residuos (McDougall - White, 2004).

El éxito de cualquier sistema de clasificación en origen que se proponga depende fundamentalmente de la participación de la población. Por lo tanto, si se pretende crear un sistema orientado a la revalorización de los residuos, es necesario mantener campañas constantes de sensibilización y capacitación, que difundan la información tanto de las prácticas impulsadas como de los beneficios que resultan de su ejecución (Matsui *et al*, 2007).

Además, dado que mediante la implementación de este tipo de iniciativas se espera que la población en general mude sus hábitos en relación al manejo de residuos, es necesario que los cambios implementados sean llevados a cabo en forma gradual y progresiva, ya que los cambios repentinos y muy pronunciados pueden llevar al fracaso del sistema. Los sistemas que se implementan para la clasificación, almacenamiento transitorio y recolección deben ser los más sencillos posibles, de forma de facilitar su utilización por parte de la población, asegurar un desempeño adecuado y lograr obtener materiales de buena calidad, que a su vez posibiliten la viabilidad económica del sistema.

Los principales factores que inciden en la tasa de participación de la población y, en definitiva, en la cantidad y calidad de los materiales recuperados, corresponden a la dificultad para efectuar la clasificación, la confiabilidad del sistema de recolección, el espacio necesario para almacenar los residuos en las residencias, la distancia a los puntos de recepción de materiales, los problemas de higiene tanto dentro de los hogares como en los espacios públicos, la preocupación de la población respecto a este tema, la presión de los vecinos, los aspectos legales, y la existencia de rutas alternativas de disposición.

La sostenibilidad de los mercados de los materiales recuperados es determinante en la definición de las medidas a adoptar. A su vez, es necesario tener en cuenta que si se logra mantener de forma sostenida un sistema de recolección selectiva con un nivel suficiente de captación de materiales, es posible influir fuertemente en el desarrollo de estos mercados.

II.3 Recolección y transporte

El primer proceso incluido dentro de los límites del sistema corresponde a la recolección de las distintas fracciones de residuos generados y su transporte hacia las correspondientes operaciones unitarias para su tratamiento y disposición. La efectividad con que se realice esta operación es determinante en el éxito del sistema de gestión de residuos.

Es de gran importancia lograr una elevada eficiencia de recolección de residuos, evitando así su acumulación en los puntos de almacenamiento, que pueda originar olores molestos, proliferación de insectos, animales y vectores transmisores de enfermedades, etc. Además, se debe evitar el desvío de residuos hacia actividades informales de clasificación o disposición inadecuada (cursos de agua, espacios públicos, red de saneamiento, etc.), que puedan afectar la salud de la población y la higiene de los espacios públicos.

La planificación del servicio de recolección y transporte requiere considerar el nivel de servicio deseado (universalidad y regularidad de la recolección), características del área de cobertura (distancias, zonificación, rutas y accesos), características de la carga (origen, volumen, composición, densidad, compatibilidad con otras cargas, etc.), características del equipamiento disponible (flota de vehículos, capacidad de mantenimiento, etc.) y capacidades del personal a cargo de las tareas (cantidad de personal y capacitación) (CEMPRE, 2010).

Un sistema integral de gestión de RSU puede incluir diversos métodos combinados de recolección, cuyo objetivo debe ser la captación eficiente de todos los residuos generados para darles el destino adecuado de tratamiento o disposición, produciendo cargas ambientales y costos mínimos (McDougall - White, 2004).

II.4 Incineración

La incineración consiste en la quema de los residuos, siendo uno de los métodos más utilizados a nivel mundial para el tratamiento de residuos, principalmente en aquellos países con una gran densidad de población y baja disponibilidad de espacio para realizar la disposición final.

Si bien puede ser considerado como un método de tratamiento para reducción del volumen previo a la disposición, el proceso de incineración puede también tener como objetivo la revalorización de residuos para la recuperación de energía.

En el presente estudio, los residuos destinados a la incineración corresponden a la totalidad de los residuos que no fueron separados en origen y que componen la fracción mixta recolectada, así como de todos los descartes generados en las distintas plantas de clasificación de materiales reciclables y la planta de acondicionamiento de la fracción húmeda.

Cabe mencionar que existen sistemas que realizan la quema selectiva de fracciones clasificadas de manera de maximizar el poder calorífico de los residuos, conformando así el llamado Combustible Derivado de Residuos (CDR), aunque dicha posibilidad no está contemplada dentro de los sistemas a evaluar en el presente trabajo.

Existen diversas ventajas respecto a la incineración como método de tratamiento de residuos. Entre las más significativas se encuentra la reducción del volumen de residuos a disponer, que dependiendo de la composición, puede alcanzar el 90 % en volumen y el 75 % en peso.

Además, la posibilidad de recuperación de la energía contenida en los residuos para la generación de energía eléctrica o térmica resulta por demás atractiva, ya que se sustituye la generación por los medios tradicionales. Por otro lado, a través del proceso de incineración los residuos son estabilizados y esterilizados.

Sin embargo, este sistema posee algunas desventajas, como son los elevados costos de instalación y operación, la exigencia de mano de obra calificada, la presencia de compuestos tóxicos y corrosivos en los residuos de la incineración, y el riesgo de emisión de agentes tóxicos en los gases de combustión.

La tecnología propuesta de incineración de RSU es la de combustión en parrilla móvil, con generación de vapor de alta presión para la generación de energía eléctrica a través de una turbina acoplada a un generador.

Los residuos ingresan a la planta de incineración en los camiones de recolección, siendo descargados a una fosa desde la cual son elevados mediante grúas hacia la tolva de alimentación por donde ingresan a la cámara de combustión. La parrilla inclinada mueve el residuo a través de la cámara provocando su exposición a las regiones de alta temperatura. De

esta manera, los residuos pasan por las fases de secado, pérdida de compuestos orgánicos volátiles y combustión de residuos carbonosos.

Al final de la parrilla, la fracción orgánica debe estar totalmente consumida, permaneciendo solamente una fracción predominantemente inorgánica, denominada ceniza de fondo. Estas deben ser enfriadas para luego ser enviadas a disposición final.

Parte del aire de combustión ingresa por debajo de la parrilla, que tiene la función de secado y volatilización de los componentes, mientras que el resto es inyectado por sobre la carga a alta velocidad para la generación de turbulencia y mezcla de los gases.

Los gases de combustión salen de esta región a alta temperatura para intercambiar calor en la producción de vapor utilizado para la generación de energía eléctrica. Dado que estos gases pueden contener diversos compuestos extremadamente corrosivos (HCl, Cl₂, HF, etc.) los materiales de construcción deben estar revestidos con materiales refractarios especiales y la temperatura del vapor debe ser limitada a los 420 °C (CEMPRE, 2010).

Los sistemas de limpieza de gases se componen generalmente en una primera instancia de depuradores secos o semisecos para la remoción de

gases ácidos por contacto directo con un reactivo alcalino, generalmente cal, que se introduce en forma neumática a un reactor de flujo ascendente o como una pasta húmeda mediante atomización en pequeñas gotas. De esta manera, el polvo fino seco con los gases ácidos absorbidos es arrastrado con la corriente de gas y eliminados posteriormente en los equipos de control de partículas.

El equipo normalmente utilizado para la remoción de partículas de los gases es el precipitador electrostático, en el cual las partículas son cargadas eléctricamente mediante una descarga de alto voltaje y captadas en una placa también cargada eléctricamente. Este material fino, denominado cenizas volantes y cuya carga contaminante es generalmente mucho mayor que las cenizas de fondo, es colectado por un sistema de limpieza para ser enviado a disposición final como residuo peligroso.

Por último, es posible la instalación de un lecho de carbón activado para la adsorción de dioxinas y furanos, así como otros compuestos que no hayan podido ser removidos.

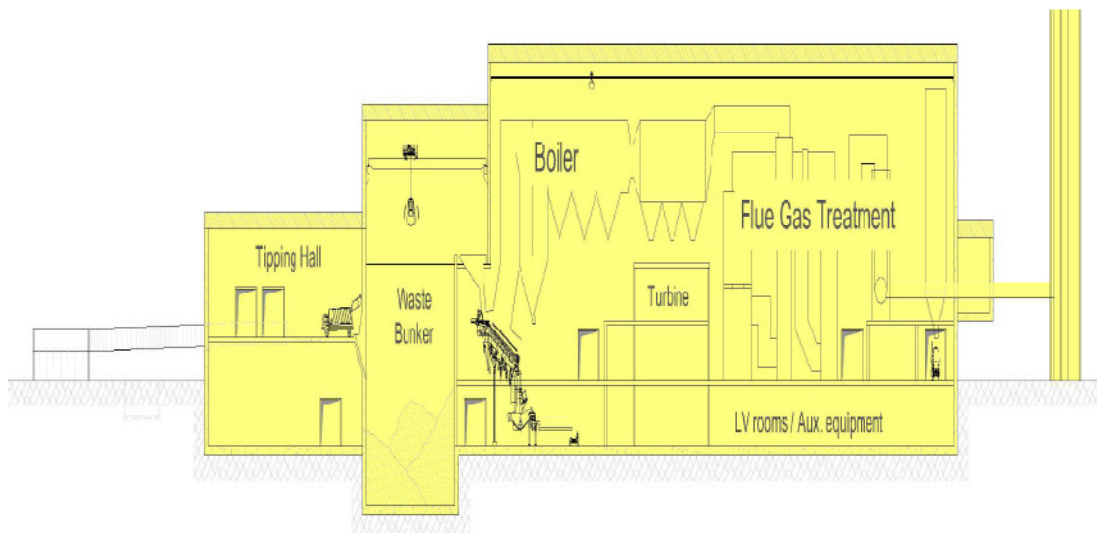
En algunos casos, además de los controles operativos de combustión como la temperatura y la inyección de aire, para el control de las emisiones de los

NO_x se inyecta amoníaco gaseoso en la cámara de combustión pasando luego los gases a través de un lecho catalítico de metales (cobre, hierro, cromo, etc.), pudiendo reducir las emisiones de NO_x hasta en un 90 %.

En la siguiente figura se muestra un diagrama esquemático de una instalación de una planta de incineración de RSU con sus distintos componentes.

Figura II.1. Esquema de una instalación de una planta incineradora de RSU.

Fuente: (Themelis - Diaz, 2012)



Existen diversas condiciones de operación (buenas técnicas de combustión) de los incineradores que deben ser controladas para lograr una adecuada descomposición de los compuestos, entre las cuales se pueden mencionar (CEMPRE, 2010):

- Temperatura en la cámara de combustión: la temperatura recomendada de los gases de combustión es de 1.200 °C, de forma de asegurar una velocidad elevada de descomposición de los compuestos presentes.
- Nivel de oxígeno en los gases de combustión: el nivel mínimo de oxígeno que debe mantenerse para lograr una combustión completa es de 7 %, aunque niveles superiores pueden provocar la disminución de la temperatura.
- Turbulencia en la cámara de combustión: es necesario que la turbulencia dentro de la cámara de combustión sea muy elevada, de manera de promover el contacto entre el oxígeno y los compuestos orgánicos.
- Tiempo de residencia de los gases de combustión: el tiempo de residencia de los gases en la cámara de combustión debe encontrarse en el entorno de los 2 segundos para asegura que se alcanza una combustión completa.

Además de mantener las buenas técnicas de combustión, para que la emisión de contaminantes sea minimizada, es necesario contar con un apropiado sistema de control y monitoreo de las condiciones de operación, tanto del proceso de combustión como de la limpieza de gases, de manera de permitir el ajuste de los parámetros y lograr las condiciones adecuadas. La definición del tipo de monitoreo a implementar depende de los parámetros de mayor importancia en el control del proceso, de las exigencias legales, ya sea de los parámetros operacionales como del equipo a utilizar, de los costos

de instalación, operación y mantenimiento, y de la mano de obra requerida. Entre los más importantes se pueden mencionar la temperatura y presión de la cámara de combustión, el caudal de los gases de combustión, y la concentración de los gases de combustión (CEMPRE, 2010).

Para un adecuado dimensionamiento de la unidad de incineración, así como del sistema de limpieza de gases, es fundamental la determinación precisa de la composición y el contenido energético de los residuos a incinerar. Entre los parámetros de mayor importancia se encuentran el poder calorífico de los residuos, el cual indica la energía que puede ser liberada durante la combustión; el contenido de cenizas, que determina la cantidad de residuos a disponer; la humedad, que determina el calor que se pierde en su evaporación; y la presencia de sustancias tóxicas o sus precursores, que determina la peligrosidad de las cenizas y de las emisiones, estableciendo los sistemas necesarios de control.

Por otro lado, también se requiere el uso de un combustible auxiliar (gas natural, biogás, etc.) para calentar el horno durante el arranque del incinerador o para mantener la temperatura del hogar cuando el PCI de los residuos es muy bajo.

II.5 Plantas de clasificación y acondicionamiento

Dado que las fracciones de residuos separados en origen pueden contener distintos materiales contaminantes, es necesario realizar una clasificación de los materiales previa para que puedan ser finalmente recuperados. De acuerdo a los sistemas de gestión a evaluar, se plantea la implementación de plantas de clasificación y acondicionamiento de los materiales contenidos en la fracción seca separada en origen y recolectada en los distintos puntos de entrega voluntaria.

Se asume que la operativa de estas plantas de clasificación es de forma manual, similar a las plantas que se encuentran en proceso de implantación por parte de la IdeM en distintas zonas de Montevideo (ver II.5 Sistema actual de gestión de RSU en el AMM).

La operativa de este tipo de planta consiste en una cinta transportadora sobre la cual se distribuyen los residuos recolectados que son separados por operarios distribuidos a lo largo de la cinta y depositados en recipientes específicos para cada material. Dependiendo de la naturaleza y requerimientos de cada tipo de material, las principales operaciones llevadas a cabo en esta planta consisten en limpieza, compactación, enfardado, reducción del tamaño, etc.

A su vez, a medida que la separación en origen y la recolección aumentan, puede ser conveniente incorporar algún otro tipo de dispositivo automático, como cribas, separadores neumáticos y magnéticos, a través de las cuales sea posible incrementar la capacidad de procesamiento y la eficiencia de clasificación.

Por otro lado, existe cierta cantidad de residuos que son descartados por no cumplir con los requisitos de los materiales destinados a reciclaje, ya sea por su grado de contaminación o porque fueron mal clasificados en origen. Los residuos descartados de las plantas de clasificación son recolectados e incorporados al resto de la fracción mixta.

Cabe mencionar que la planta de tratamiento biológico también requiere una primera etapa de acondicionamiento de los materiales orgánicos previo a su ingreso al reactor de digestión, la cual consiste básicamente en la reducción de tamaño de las partículas y la separación de materiales contaminantes, principalmente plásticos. Al igual que en las plantas de clasificación, este material descartado es desviado junto a la fracción mixta hacia la planta de incineración. Esta planta puede ser considerada como parte de la operación de tratamiento biológico, así como los aspectos ambientales, por lo que no será tratado en esta sección (ver 5.8 Tratamiento biológico)

II.6 Reciclaje

El flujo de materiales clasificados y acondicionados que salen de las plantas de clasificación es transportado hacia las distintas industrias de reciclaje donde son reprocesados para la obtención de nuevos materiales, a partir de los cuales es posible fabricar distintos tipos de productos. Los materiales que serán considerados en los procesos de reciclaje son:

- Papel y cartón
- Vidrio
- Metales ferrosos
- Metales no ferrosos
- Plásticos rígidos
- Plásticos laminados

Si bien debido a aspectos técnicos o económicos existen algunos residuos cuyo reciclaje no es posible, principalmente aquellos que son compuestos por más de un material, el desarrollo de nuevas tecnologías de reciclaje ha posibilitado la expansión de estos procesos. Por lo tanto, es posible pensar que en el futuro se de una evolución de la industria y el mercado de los materiales reciclados, que posibilite la incorporación de nuevas fracciones de residuos a los circuitos de reciclaje.

Si bien el presente estudio no entrará en el detalle de los procesos de reciclaje de cada uno de estos materiales, se admitirá que cada uno de ellos ingresa a los sistemas que son usualmente utilizados en la obtención de distintos productos comercializables. En este sentido, es necesario tener en cuenta que la carga ambiental de cada sistema depende de los procesos llevados a cabo y de los productos elaborados. En secciones anteriores fueron descriptas las características de los principales emprendimientos dedicados al reciclaje a nivel local (ver I.8 Mercado de materiales reciclables).

Como ya fue mencionado, se asume que cada material reciclado posee las mismas propiedades y funcionalidad que los materiales fabricados a partir de materia prima virgen y los sustituyen en cantidades iguales. Esto no es necesariamente cierto, ya que los materiales obtenidos a partir del proceso de reciclaje tienen generalmente calidades inferiores, dada la baja homogeneidad y el nivel de impurezas presentes en los residuos, por lo que son utilizados para la confección de otro tipo de productos. Además, en algunos procesos de fabricación de materiales vírgenes es común, e incluso necesaria, la incorporación de cierta cantidad de materiales recuperados.

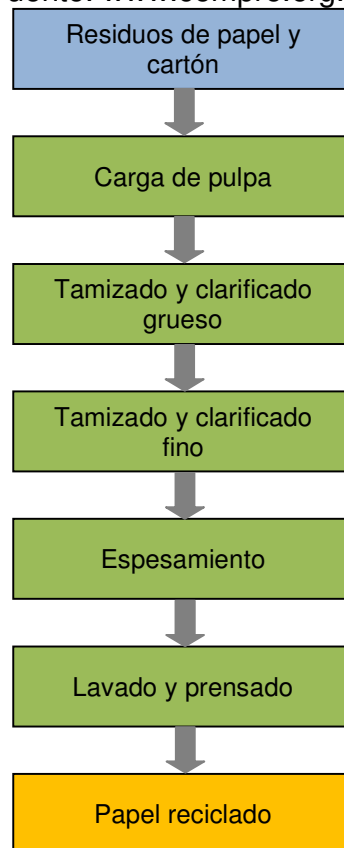
La fabricación del **papel** consiste en el procesamiento químico o mecánico de una materia prima vegetal fibrosa, como la madera, a partir de la cual se obtiene la pasta de celulosa donde las fibras se encuentran liberadas. El proceso mayormente utilizado corresponde al método Kraft, el cual consiste en la digestión química de la madera previamente chipeada, utilizando una solución de sulfuro de sodio y soda. El licor resultante de la digestión es quemado para la producción de energía térmica y eléctrica, mientras que las cenizas que contienen los productos químicos son incorporadas nuevamente al digestor. Dependiendo del producto que se desee elaborar, la pulpa obtenida puede ser blanqueada mediante diversos métodos para la posterior producción de papel a través del secado a presión.

Por su parte, el reciclaje de papel se basa en revertir este proceso mediante hidratación de las fibras y agitación, dando como resultado la separación de las fibras. Se estima entre aproximadamente 7 y 10 la cantidad de veces que las fibras pueden ser reprocesadas. Los principales tipos de papel que pueden ser reciclados son el papel periódico, papel y cartón ondulado, y papel de oficina. En contraposición, la presencia de algunos componentes, como son ceras o gomas del papel satinado, restos orgánicos, plásticos, metales, adhesivos, etc., puede provocar problemas en el proceso de reciclaje.

En la siguiente figura se muestra esquemáticamente los procesos de reciclaje de papel y cartón a partir de materiales recuperados.

Figura II.2. Diagrama esquemático del proceso de reciclaje de papel y cartón.

Fuente: www.cempre.org.uy



La producción de **vidrio** se realiza sometiendo a sus diferentes materias primas a temperaturas muy elevadas para fundirlas, para ser posteriormente enfriadas rápidamente obteniendo una masa homogénea rígida traslúcida no cristalina. El componente principal es sílice, el cual se encuentra en la arena

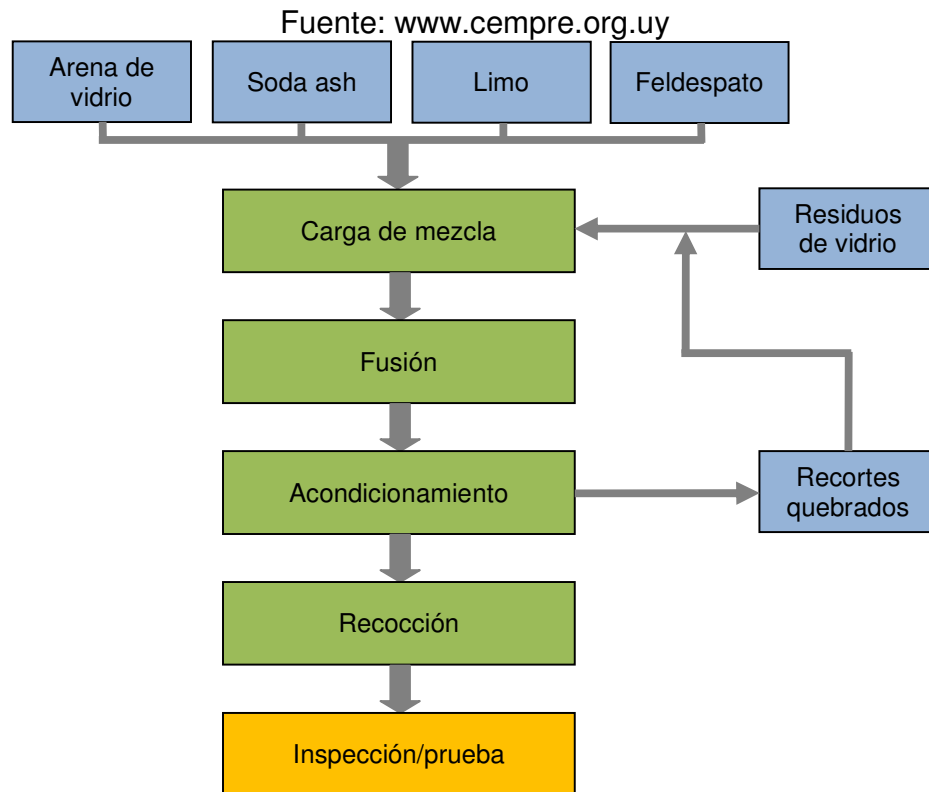
en forma abundante, aunque también se requieren otros compuestos que le confieren al vidrio distintas propiedades y características especiales (cenizas de soda, feldespato, etc.), o que son utilizadas como fundentes para reducir la temperatura de fusión. La coloración al vidrio se obtiene usualmente mediante el agregado de óxidos metálicos (hierro, cromo, cobre, níquel, etc.), mientras que la presencia de impurezas determina la calidad del producto final.

Una práctica que se realiza regularmente en la fabricación de vidrio corresponde a la incorporación de vidrio recuperado en trozos a cada lote para reducir la temperatura de fusión necesaria en el horno, resultando en significativos ahorros de energía, además de disminuir el requerimiento de materias primas. Por esta razón, el proceso de reciclaje de vidrio se encuentra muy relacionado a la producción primaria a partir de materiales vírgenes, lo que dificulta la asignación diferenciada de las cargas asociadas a cada uno de estos procesos. No obstante, a través de una extrapolación de los datos para distintas tasas de incorporación de vidrio recuperado, es posible obtener valores para la asignación de flujos en la fabricación de vidrio a partir de materiales vírgenes y vidrio reciclado.

Si bien se puede considerar que la eficiencia del proceso de reciclaje de vidrio es muy cercana al 100 % y sin pérdidas en la calidad, es decir que todo el vidrio reprocesado se convierte en un nuevo producto con las mismas propiedades, además de ser un material que puede ser reciclado una gran cantidad de veces, es necesario realizar una correcta clasificación y limpieza del vidrio recuperado para que este no posea contaminación con otros materiales y afecte las características del producto final.

En la siguiente figura se muestra el proceso de fabricación de vidrio a partir de sus materias primas, en donde también se observa la incorporación de residuos de vidrio recuperados.

Figura II.3. Diagrama esquemático del proceso de fabricación y reciclaje de vidrio.

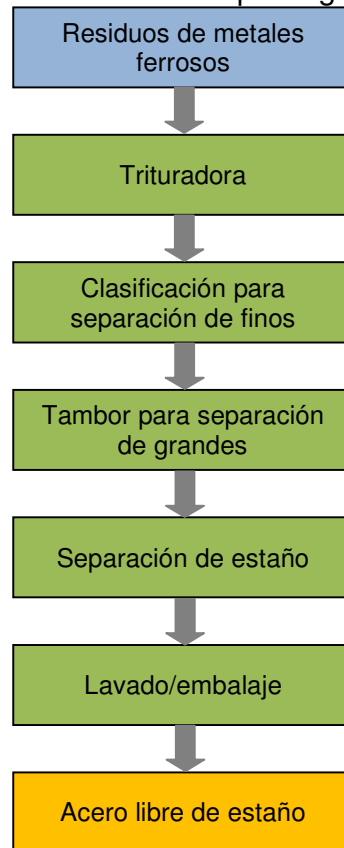


La fabricación de los **metales ferrosos**, entre los cuales se destaca el acero, se realiza por reducción de minerales de hierro en un horno a altas temperaturas, utilizando agentes reductores como el carbón, junto a otros diversos compuestos (manganeso, sílice, fósforo, azufre, etc.). Además de la composición, las propiedades mecánicas del producto final elaborado quedan definidas por la curva de calentamiento y enfriamiento de los materiales.

En cuanto al proceso de reciclaje de metales ferrosos, este se da por simple fusión de los residuos metálicos, por lo que el consumo de energía es considerablemente menor. Si bien se trata de un material 100 % reciclable y puede reciclarse infinitas veces, muchas veces se encuentra junto a otros materiales que pueden dificultar el proceso. Por esta razón, previo a la fusión, los residuos de metales requieren de una separación de estos materiales y una limpieza para eliminar los contaminantes químicos presentes. Un caso particular representa la remoción electrolítica del estaño de las latas de alimentos (hojalata), el cual es utilizado para dar resistencia a la oxidación y al ataque por ácidos orgánicos.

Figura II.4. Diagrama esquemático del proceso de reciclaje de acero utilizado hojalata.

Fuente: www.cempre.org.uy



Entre los **metales no ferrosos** el de mayor importancia dentro de los RSU es el aluminio, principalmente en forma de latas usadas de bebidas, por lo que las consideraciones aquí expuestas se basan en dicho material.

La fabricación de aluminio virgen se realiza a partir de la bauxita, la cual es primero tratada en caliente con soda cáustica para disolver los óxidos de aluminio, que son luego cristalizados y separados de la solución por

enfriamiento. El sólido obtenido es posteriormente fundido a altas temperaturas y electrolizado por pasaje de una corriente eléctrica de gran intensidad, donde el aluminio fundido es extraído y moldeado en lingotes. Como puede suponerse, el consumo de energía, ya sea térmica como eléctrica, es muy elevado. Por su parte, el reprocesamiento de aluminio recuperado se basa en su fundición, siendo necesaria la limpieza y separación de componentes contaminantes.

Los **plásticos** son producidos a partir de petróleo, gas natural, carbón y sal, siendo el petróleo la principal materia prima, a partir del cual la industria petroquímica proporciona los monómeros que son polimerizados para la producción de plásticos. En su forma básica, los plásticos se producen en forma de polvos, gránulos, líquidos y soluciones, que mediante la aplicación de calor y presión resulta en el producto final plástico.

Los productos plásticos más comunes corresponden a las resinas termoplásticas, las cuales fluyen como líquidos viscosos por aplicación de calor y se solidifican cuando se enfrían. Este proceso puede repetirse muchas veces sin que el producto final pierda sus propiedades, lo que hace posible el reciclaje de estos materiales.

Sin embargo, debido a la gran variedad de tipos de plásticos existentes, los cuales son generalmente incompatibles unos con otros, los materiales recuperados de los residuos deben ser adecuadamente clasificados para no afectar las características del producto final elaborado.

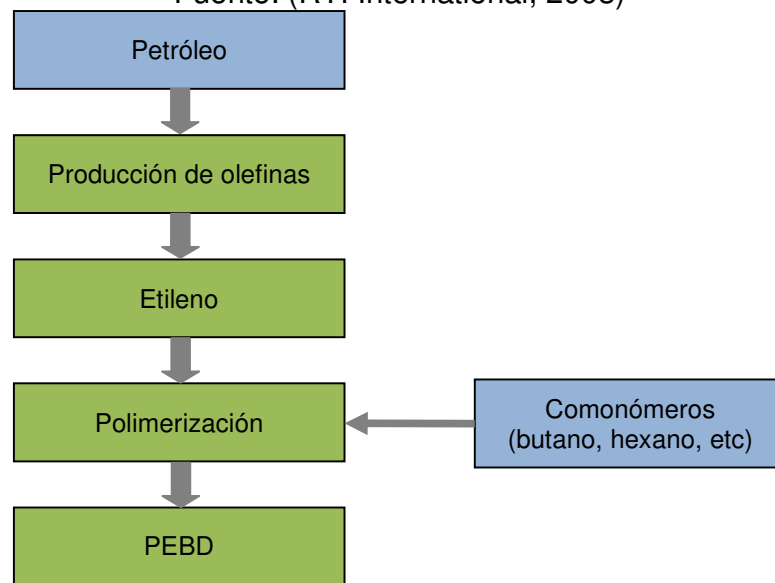
En el proceso de reciclaje, el plástico debe ser triturado, lavado y secado, removiendo todo tipo de contaminantes extraños. El método más comúnmente utilizado para el reciclaje de plásticos es la extrusión del material, que consiste en fundir y homogeneizar el material por aplicación de una presión elevada, obligando al pasaje por pequeños orificios de los cuales salen hilos de plásticos, que son enfriados por agua y cortados, formando gránulos de plásticos que son luego utilizados en la fabricación de nuevos productos.

De forma de tener en cuenta los distintos tipos de plásticos existentes y poder aproximar la asignación de las cargas ambientales derivadas de la producción de cada uno, en el presente trabajo se diferencian dos tipos de plásticos, plásticos rígidos y plásticos laminados. Si bien esta categorización no es específica en cuanto a abarcar todos los diferentes plásticos que se encuentran en los RSU, intentar hacerlo agregaría complejidad al estudio

innecesariamente, ya que no se dispone de una caracterización fina de la composición de los mismos.

Figura II.5. Diagrama esquemático del proceso de fabricación de PEBD.

Fuente: (RTI International, 2003)



II.7 Tratamiento biológico

El tratamiento biológico consiste en la descomposición de la fracción orgánica biodegradable presente en los RSU por acción de microorganismos.

Esta descomposición puede realizarse en forma aerobia (compostaje), en la cual los microorganismos utilizan el oxígeno molecular como aceptor de electrones en su metabolismo, implicando altos rendimientos celulares; o

anaerobia (digestión), la cual se realiza en ausencia de oxígeno y sin un aceptor externo de electrones, presentando bajos rendimientos celulares.

Los productos del tratamiento biológico son fundamentalmente dióxido de carbono y agua en el proceso aerobio, o dióxido de carbono y metano en el proceso anaerobio, además de un residuo sólido estabilizado.

Entre las ventajas de realizar un tratamiento biológico de los RSU se pueden mencionar la reducción de volumen producto de la descomposición de la materia orgánica en metano, dióxido de carbono y agua, lo que resulta en un menor volumen de residuos que requieren de su disposición. Además, el resultado de la descomposición corresponde a un material más estable, ya que a un mayor grado de maduración, disminuye su DQO y su relación carbono/nitrógeno (C/N), reduciendo la velocidad de descomposición. En el caso del compostaje, dada la naturaleza exotérmica del tratamiento, pudiendo alcanzar temperaturas de hasta 65 °C en el tratamiento aerobio, este material se encuentra pasteurizado respecto a la presencia de organismos patógenos (McDougall - White, 2004).

Por otro lado se encuentra la valorización de los residuos, ya sea por la producción de metano (biogás) como de compost (bioabono). La

descomposición anaerobia produce un gas combustible que puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica. A su vez, el tratamiento produce un material orgánico que, dependiendo de la calidad de los residuos utilizados, puede ser usado como mejorador de suelos, fertilizantes o material de relleno del SDF.

Los residuos que ingresan a la planta de tratamiento biológico corresponden a la fracción húmeda separada en origen, almacenadas en contenedores especiales para recibir esta fracción y recolectada de forma aislada al resto de los residuos. Dado este sistema de recolección, se puede considerar que estos materiales se encuentren mayoritariamente libres de contaminantes.

Cabe mencionar que es posible la incorporación de otras fracciones de los RSU, como son el papel y los residuos de podas (residuos verdes), lo cual es una práctica habitual que incluso presenta ciertas ventajas en el tratamiento aerobio, ya que disminuye el contenido de agua libre, mejora la capacidad de aireación, aumenta la relación C/N y disminuye la generación de olores molestos. Sin embargo, en el presente trabajo no se considera dicha posibilidad.

Se adopta como localización de la planta de tratamiento biológico el mismo predio del SDF de Felipe Cardozo, por lo que ya se cuenta con las correspondientes infraestructuras y vías de acceso.

La tecnología seleccionada para el tratamiento anaerobio corresponde al sistema DRANCO desarrollado por la empresa Organic Waste Systems (OWS N.V.) de origen belga, que consiste en una digestión seca de la Fracción Orgánica de los RSU (FORSU) llevada a cabo en un reactor vertical de flujo descendente²⁰.

Previamente a su ingreso al sistema de tratamiento anaerobio, la fracción húmeda recolectada debe ser acondicionada, retirando los materiales extraños (vidrios, plásticos, textiles, etc.), los cuales son incorporados a la corriente de la fracción mixta. La FORSU obtenida es luego triturada y tamizada, de modo que el tamaño de partícula no supere los 40 mm.

El flujo de residuos tamizado se mezcla con un flujo 5 veces mayor de material digerido, para luego ser calentado con vapor e ingresado a un digestor vertical de flujo descendente, mediante una bomba tipo cementera. El contenido del digestor se mantiene a una temperatura entre 50 y 55 °C, y

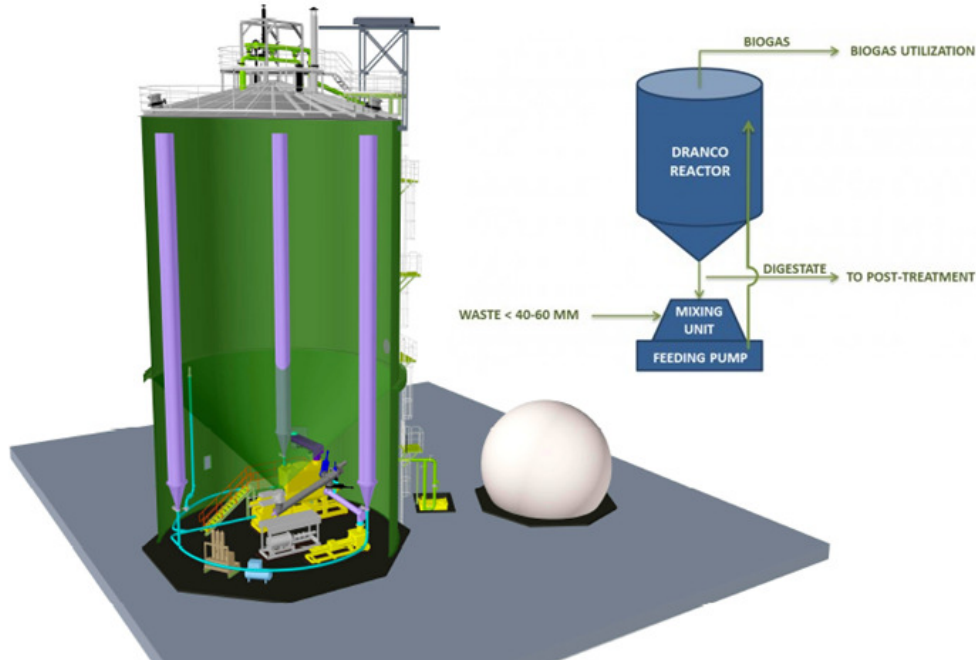
²⁰http://www.ows.be/household_waste/dranco/

es recirculado 6 a 7 veces, para alcanzar un tiempo de estadía medio de 20 días. El digestor no requiere más mezcla que la generada por la producción de gas y por la recirculación indicada (Baere, S/A).

El producto digerido que sale del proceso anaerobio entra en un proceso de maduración aerobio en el que permanece en el entorno de dos semanas si se realiza en fosas aireadas o entre 50 y 60 días si se realiza en pilas al aire libre.

Figura II.6. Esquema de la instalación del sistema DRANCO de digestión de la FORSU.

Fuente: (Baere, S/A)



II.8 Disposición final

La disposición final se refiere al almacenamiento seguro a largo plazo de los residuos. Dado que algunas corrientes de residuos no pueden ser tratados por ninguna operación de tratamiento y a su vez el resto de las unidades de tratamiento generan sus propios residuos que requieren disposición, siempre existe necesidad de un SDF como parte del sistema de gestión de RSU.

En el marco de un estudio del ciclo de vida de los residuos, es conveniente considerar la disposición final como un proceso unitario con sus entradas y salidas, y donde parte de los materiales depositados sufren cambios en su naturaleza. Las salidas del proceso son emisiones líquidas y gaseosas producto de la descomposición, y residuos sólidos estabilizados que permanecen en el SDF.

Su simplicidad, los bajos costos de instalación y operación, así como su capacidad de recibir distintos tipos de residuos, ha provocado que históricamente la disposición final haya sido considerada como el principal método de disposición de residuos. A pesar de esto, la expansión de los centros urbanos, el aumento de los precios de la tierra y una mayor concientización respecto a las cuestiones ambientales, torna cada vez más difícil encontrar lugares adecuados para la instalación de SDF. Por lo que en

muchos casos es necesario complementar la disposición final con otros métodos de tratamiento que logren reducir el volumen de residuos a disponer.

Una de las principales desventajas de la disposición final radica en la necesidad de contar con un sistema adecuado de control, ya que dada la naturaleza de estos sistemas, las respuestas ante eventuales contingencias pueden darse en forma muy tardía. Por esta razón, entre otros aspectos, pueden verse significativamente incrementados los costos de instalación y operación de los SDF.

En el presente estudio se considera únicamente el SDF de Felipe Cardozo ubicado en la ciudad de Montevideo, ya que este recibe actualmente el 85 % aproximadamente de los residuos generados en el AMM. A su vez, dado que el objetivo del análisis es de carácter prospectivo en el largo plazo, se asumirá operativa la celda de seguridad para residuos peligrosos que será instalada por iniciativa de la Cámara de Industrias del Uruguay (CIU) en las propias instalaciones de Felipe Cardozo.

De acuerdo a los sistemas de gestión de RSU planteados, los residuos que ingresan al SDF pueden ser la fracción mixta, las cenizas y lodos de la planta de incineración, y el compost producido en el tratamiento biológico.

Se asume un peso específico medio para la fracción mixta compactada en el SDF de 700 kg/m^3 (CEMPRE, 2010). Mientras que para las cenizas provenientes del incinerador, se asume un valor de 950 kg/m^3 . Este valor surge de adoptar un contenido de 77 % de cenizas y lodos (800 kg/m^3), 1 % de metales no ferrosos (700 kg/m^3), 7 % de metales ferrosos (1.500 kg/m^3) y 15 % de vidrio (1.600 kg/m^3) (Tchobanoglous, 1994).

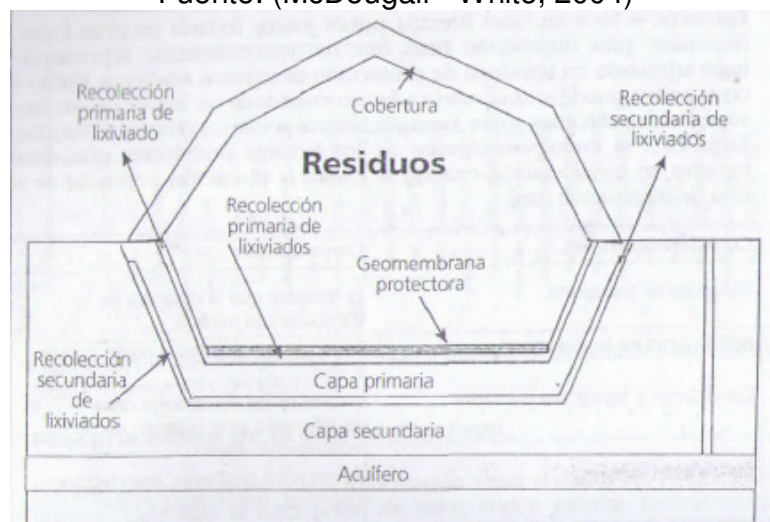
El diseño adoptado para el SDF corresponde al de relleno sanitario. Esto supone la existencia de un recubrimiento inferior para evitar la infiltración de lixiviados, compuesto de una primera capa de material arcilloso de baja permeabilidad hidráulica y por encima una membrana de PEAD. Por su parte, el sistema de recolección de lixiviados consiste en una red de tuberías perforadas donde el líquido drena, por gravedad o por bombeo, hacia una planta de tratamiento (McDougall - White, 2004).

A medida que las celdas del relleno se llenan, estas son cubiertas superficialmente con material de cubierta y una membrana plástica, para luego reconstituir la porción de suelo sobre el SDF.

En cuanto al biogás generado, este migra horizontalmente entre los residuos compactados y es recolectado en tuberías verticales que emergen del relleno. Una vez recolectado, el biogás puede ser quemado en antorcha o ser utilizado como combustible.

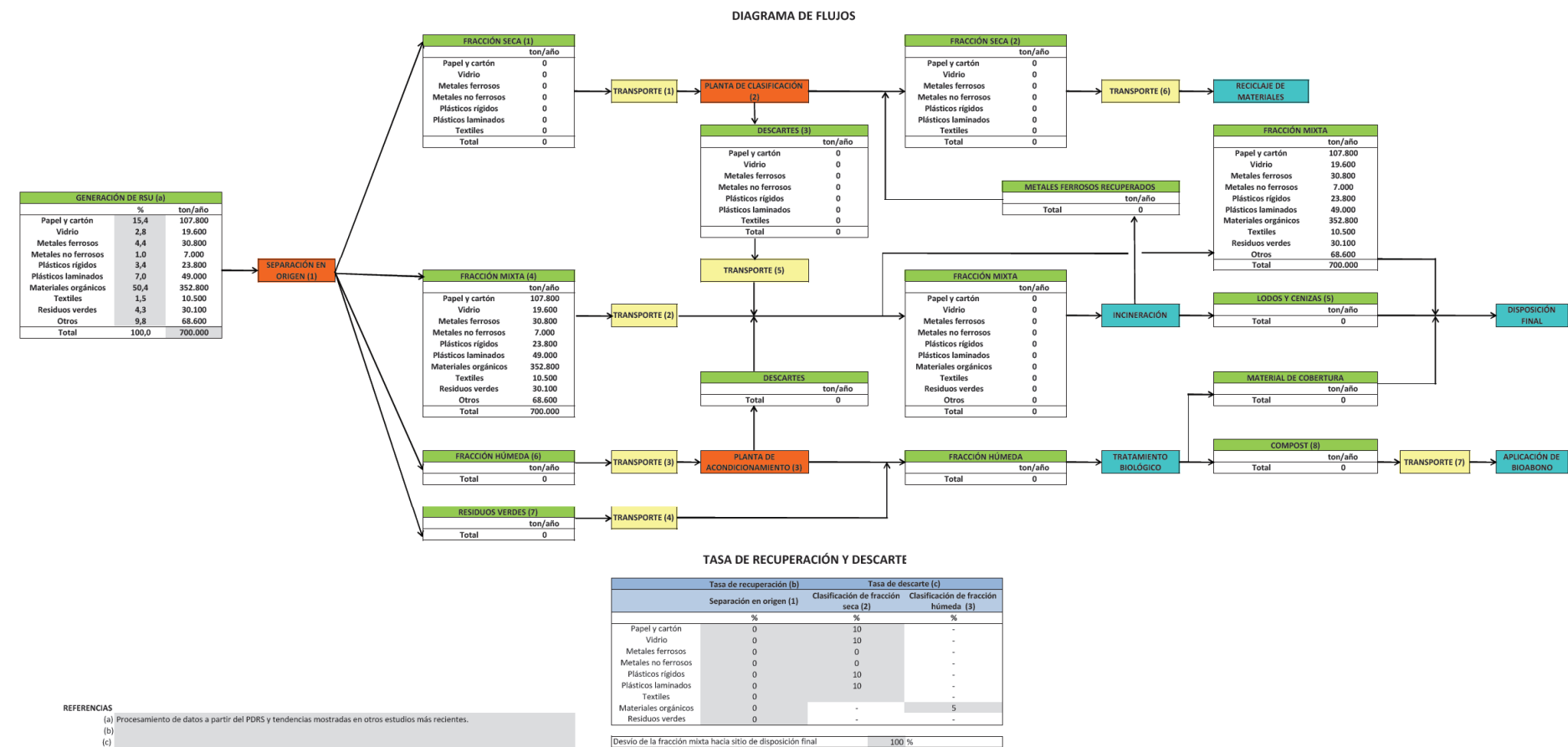
Figura II.7. Esquema simplificado de un relleno sanitario con sus distintos componentes.

Fuente: (McDougall - White, 2004)



ANEXO III: RESULTADOS DEL MODELO

III.1 SO_EP



PESOS ESPECÍFICOS

	FRACCIÓN SECA (1)		FRACCIÓN SECA (2)		DESCARTES (3)	
	Materiales sueltos (a)		Materiales compactados (b)		Materiales sueltos (c)	
	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3
Papel y cartón	0	89	0	131	0	89
Vidrio	0	196	0	481	0	196
Metales ferrosos	0	89	0	160	0	89
Metales no ferrosos	0	160	0	240	0	160
Plásticos rígidos	0	65	0	131	0	65
Plásticos laminados	0	65	0	131	0	65
Materiales orgánicos	-	-	-	-	-	-
Textiles	0	65	0	101	0	65
Residuos verdes	-	-	-	-	-	-
Otros	-	-	-	-	-	-
Escorias y cenizas	-	-	-	-	-	-
Compost	-	-	-	-	-	-
Total	0	#DIV/0!	0	#DIV/0!	0	#DIV/0!

	FRACCIÓN MIXTA (4)		ESCORIA, CENIZAS Y LODOS (5)		FRACCIÓN HÚMEDA (6)	
	Materiales compactados (d)		(e)		Materiales compactados (f)	
	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3
Papel y cartón	107.800	451	-	-	-	-
Vidrio	19.600	451	-	-	-	-
Metales ferrosos	30.800	451	-	-	-	-
Metales no ferrosos	7.000	451	-	-	-	-
Plásticos rígidos	23.800	451	-	-	-	-
Plásticos laminados	49.000	451	-	-	-	-
Materiales orgánicos	352.800	451	-	-	0	451
Textiles	10.500	451	-	-	-	-
Residuos verdes	30.100	451	-	-	-	-
Otros	68.600	451	-	-	-	-
Escorias y cenizas	-	-	0	950	-	-
Compost	-	-	-	-	-	-
Total	700.000	451	0	950	0	451

	RESIDUOS VERDES (7)		COMPOST (8)		RESIDUOS EN DISPOSICIÓN FINAL	
	Materiales sueltos (g)		Materiales a granel (g)		Materiales compactados (h)	
	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3
Papel y cartón	-	-	-	-	107.800	700
Vidrio	-	-	-	-	19.600	700
Metales ferrosos	-	-	-	-	30.800	700
Metales no ferrosos	-	-	-	-	7.000	700
Plásticos rígidos	-	-	-	-	23.800	700
Plásticos laminados	-	-	-	-	49.000	700
Materiales orgánicos	-	-	-	-	352.800	700
Textiles	-	-	-	-	10.500	700
Residuos verdes	0	101	-	-	30.100	700
Otros	-	-	-	-	68.600	700
Escorias y cenizas	-	-	-	-	0	700
Compost	-	-	0	326	0	700
Total	0	101	0	326	700.000	700

REFERENCIAS

- (a) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (b) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (c) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1. En este caso coincide con la Fracción Seca (1) por la forma en que son transportados.
- (d) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (e) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (f) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (g) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (h) CEMPRE

ENERGÍA Y COMBUSTIBLES

Matriz de generación de energía eléctrica (a)	
	%
Generación hidráulica	51,0
Generación eólica	24,0
Generación térmica fuel-oil	1,0
Generación térmica gas oil	
Generación térmica gas natural	6,0
Generación térmica biomasa	18,0
Total	100

Factores emisión por uso de combustibles fósiles (b)				
		Gas natural	Gas oil	Fuel oil
		g/m ³	g/L	g/L
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	2189,5	3489,8	3385,5
	CH ₄	6,09	0,52	0,56
	N ₂ O	1,92E-04	1,35E-02	1,35E-02
	SO _x	31,57	24,77	23,25
	NO _x	8,17	7,24	5,30
	HCl	1,57E-03	3,00E-03	8,47E-02
	NH ₃	4,82E-02	4,79E-03	2,13E-01
	Dioxinas y furanos	1,76E-12	3,00E-12	3,15E-10
	Hg	1,20E-06	1,59E-04	1,05E-05
Emisiones al agua	DQO	0,69	0,10	0,11
	N total	7,34E-04	1,30E-03	1,40E-03
	P total	5,75E-05	6,00E-03	1,49E-04
	Dioxinas y furanos			
	Hg	1,76E-07	1,17E-08	1,32E-08

Factores emisión para la generación eléctrica (c)						
		Térmica fuel oil	Térmica gas oil	Térmica gas natural	Biomasa	Total
		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	898,5	1236,6	665,3	0,0	48,9
	CH ₄	0,15	0,18	1,85	0,00	0,11
	N ₂ O					0,00E+00
	SO _x	6,18	8,78	9,58	0,03	0,64
	NO _x	1,41	2,56	2,48	0,65	0,28
	HCl	2,25E-02	1,06E-03	4,79E-01	0,00E+00	2,90E-02
	NH ₃	5,64E-02	1,70E+00	1,47E-02		1,44E-03
	Dioxinas y furanos					0,00E+00
	Hg					0,00E+00
Emisiones al agua	DQO	0,03	0,04	0,21	0,00	0,01
	N total	3,72E-04	4,62E-04	2,23E-04		1,71E-05
	P total	3,95E-05	2,13E-03	1,74E-05		1,44E-06
	Dioxinas y furanos					0,00
	Hg	3,50E-09	4,16E-09	5,35E-08	0,00E+00	3,25E-09

Energía térmica de combustibles (d)	
Gas oil	0,0387 GJ/L
Fuel oil	0,0417 GJ/L
Gas natural	0,0381 GJ/m ³
Biomasa	0,0241 GJ/kg

COMENTARIOS

- Se considera que las emisiones asociadas a la energía desplazada en las distintas operaciones unitarias se reparten de acuerdo a la matriz de generación.
- Los factores de emisión por uso de combustible incluyen la producción y consumo.

REFERENCIAS

- (a) Promedio 2008/2012. DNE: <http://www.dne.gub.uy/-/series-estadisticas-de-energia-electrica->
- (b) EPA-RTI. Energy model, Appendix C Table 1 (1999)
- (c) EPA-RTI. Energy model, Appendix B Table 1 (1999)
- (d) EPA-RTI. Energy model, Table 3-7 (1999)

RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE

Consumos específicos de combustible (a)	
Camión abierto en ciudad	40 L/100km
Camión abierto en media distancia	30 L/100km
Camión compactador	0,15 L/(km.ton)

Capacidad de carga del camión (b)	
Camión abierto	20 m3
Camión compactador	10 ton

Transporte de la fracción seca separada en origen hacia plantas de clasificación (1)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	10 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de la fracción mixta hacia planta de incineración o SDF (2)	
Tipo de vehículo	Camión compactador
Cantidad de residuos transportados	700.000 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	25 km
Consumo de combustible	2.625.000 L/año

Transporte de la fracción húmeda hacia planta de tratamiento biológico (3)	
Tipo de vehículo	Camión compactador
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	25 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de residuos verdes hacia planta de tratamiento biológico (4)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	30 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de descartes hacia planta de incineración (5)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	15 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de materiales clasificados hacia plantas de reciclaje (6)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	50 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de compost hacia sitios de aplicación (7)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	50 km
Consumo de combustible	0 L/año

Consumo de combustible	
Consumo total de combustible	2.625.000 L/año
Consumo específico de combustible	3,75 L/ton

Balance de energía	
Consumo neto de combustibles	101.471 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	n/c GJ/año
Consumo neto de energía	101.471 GJ/año

Emisiones		
		ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	9,161
	CH4	1,36
	N2O	0,0355
	SOx	65,03
	NOx	19,02
	HCl	0,01
	NH3	0,01
	Dioxinas y furanos	7,86E-12
	Hg	4,17E-04
	DQO	0,27
Emisiones al agua	N total	3,42E-03
	Ptotal	1,58E-02
	Dioxinas y furanos	0,00E+00
	Hg	3,08E-08

COMENTARIOS

- Se considera que cada una de las fracciones son recolectadas mediante el mismo sistema en todos los circuitos, lo cual no es necesariamente cierto si se consideran circuitos suburbanos y rurales, y otras situaciones particulares.
- Se considera que el transporte de la fracción mixta es el mismo si esta es dirigida a la planta de incineración como al sitio de disposición final (Transporte 2), por lo que no se diferencian.
- En el consumo total de combustible está incluido el transporte de todas las corrientes (descartes, materiales clasificados, compost, etc.) y no solo de los residuos generados.
- El consumo específico de combustible está basado en la cantidad de residuos generados.

REFERENCIAS

- (a) McDougall-White, p. 419 (consumos para camión abierto).
(b)

INCINERACIÓN

Ingreso de residuos	
	ton/año
Papel y cartón	0
Vidrio	0
Metales ferrosos	0
Metales no ferrosos	0
Plásticos rígidos	0
Plásticos laminados	0
Materiales orgánicos	0
Textiles	0
Residuos verdes	0
Otros	0
Total	0

Eficiencia en la generación de energía (a)	
Eficiencia de conversión de la energía	28 %
Consumo de energía en la planta de incineración	15 %
Consumo de gas natural como combustible auxiliar	0,23 m3/ton

Factores de emisión por combustión de materiales (b)										
		Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles	Orgánicos	Otros
		g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
Emisiones al aire	CO2 fósil		15.422	43.546	43.999	2.643.581	2.745.187	1.280.000		1.280.000
	CH4	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36		1,36	
	N2O									
	SOx	381,02	6,08	14,15	14,29	1.156,36	1.112,77	118,00	162,48	118,00
	NOx	892,98	14,28	33,12	33,46	2.710,21	2.608,04	946,00	380,11	946,00
	HCl	181,08	2,89	6,72	6,79	549,57	528,85	75,00	77,21	75,00
	NH3									
	Dioxinas y furanos	2,25E-05	1,02E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,69E-04	3,50E-04	2,33E-05	1,08E-05	2,33E-05
Emisiones al agua	Hg	1,72E-02	6,62E-03	1,92E-02	2,62E-02	6,62E-03	2,36E-01	5,55E-02	9,93E-03	5,55E-02
	DQO									
	N total									
	P total									
Residuos sólidos	Dioxinas y furanos									
	Hg									
		84.000	900.000	850.000	900.000	900.000	60.000	77.000	75.000	420.000

PLANTA DE CLASIFICACIÓN

Flujo de residuos	
	ton/año
Ingreso total de residuos	0
Descarte total de residuos	0

Consumo de energía eléctrica y combustible (a)	
Consumo de energía eléctrica	8 kWh/ton
Consumo de gas oil	0,1 l/ton

Consumo de energía eléctrica y combustible	
Consumo de energía eléctrica	0 MWh/año
Consumo de gas oil	0 L/año

Balance de energía	
Consumo neto de combustibles	0 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	0 GJ/año
Consumo neto de energía	0 GJ/año

Emisiones		
		ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	0
	CH4	0,00
	N2O	0,0000
	SOx	0,00
	NOx	0,00
	HCl	0,00
	NH3	0,00
	Dioxinas y furanos	0,00E+00
	Hg	0,00E+00
	DQO	0,00
Emisiones al agua	N total	0,00E+00
	P total	0,00E+00
	Dioxinas y furanos	0,00E+00
	Hg	0,00E+00

COMENTARIOS

REFERENCIAS

[a] McDougall-White (2004). RTI Input_Document_OCR Table 4.5.

RECICLAJE DE MATERIALES

Ingreso de residuos	
	ton/año
Papel y cartón	0
Vidrio	0
Metales ferrosos	0
Metales no ferrosos	0
Plásticos rígidos	0
Plásticos laminados	0
Textiles	0
Total	0

	Consumo de energía eléctrica (a)		Consumo de gas oil (b)		Consumo de gas natural (c)		Consumo de fuel oil (d)	
	Material virgen	Reciclaje	Material virgen	Reciclaje	Material virgen	Reciclaje	Material virgen	Reciclaje
	kWh/ton	kWh/ton	L/ton	L/ton	m3/ton	m3/ton	L/ton	L/ton
Papel y cartón	3.110	1.216	25	4	359	241	26	8
Vidrio	64	22	17	9	145	101	13	1
Metales ferrosos			57	18	405	128	714	229
Metales no ferrosos	20.502	907	98	33	758	119	477	5
Plásticos rígidos	433	689		9	339	26	315	9
Plásticos laminados	479	689		9	401	26	304	9
Textiles								

Factores de emisión en proceso de reciclaje (e)								
		Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles
		g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
Emisiones al aire	CO2 fósil			539,784	82,555	157,399	157,399	
	CH4			1,170,29				
	N2O							
	SOx	0,01	453,60	2,707,99	13,61	852,77	852,77	
	NOx	0,59		1,601,21	14,560,56	1,642,03	1,642,03	
	HCl			81,19	158,76	0,14	0,14	
	NH3							
	Dioxinas y furanos							
	Hg	0,01						
Emisiones al agua	DQO	4,944			68	274	274	
	N total			0,73	308,45	0,06	0,06	
	P total			1,12	0,83	0,00635	0,00635	
	Dioxinas y furanos							
	Hg	1,45E-05			2,49E-05	3,59E-06	3,59E-06	

Factores de emisión en fabricación del material virgen (f)								
		Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles
		g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
Emisiones al aire	CO2 fósil	0	161,482	1,651,104	1,705,536	1,964,088	2,004,912	
	CH4			2,095,63	557,93			
	N2O				2,00			
	SOx	599	454	4,627	17,917	21,591	6,895	
	NOx	304		2,504	14,833	17,781	10,251	
	HCl			61,7	49,9	99,8	63,5	
	NH3				9,53			
	Dioxinas y furanos							
	Hg	9,07E-03			7,26E-02			
Emisiones al agua	DQO	712			490	2,994	1,361	
	N total			43,39	2,95	-0,0121	3,51	
	P total			0,186	4,00E-03	2,962	1,48	
	Dioxinas y furanos							
	Hg	2,49E-05			2,68E-03			

Eficiencia de reciclaje (g)	
	%
Papel y cartón	94,3
Vidrio	97,1
Metales ferrosos	84,0
Metales no ferrosos	93,5
Plásticos rígidos	86,2
Plásticos laminados	86,2
Textiles	

Consumo de energía y combustibles	
Consumo neto de energía eléctrica	0 MWh/año
Consumo neto de gas oil	0 L/año
Consumo neto de gas natural	0 m3/año
Consumo neto de fuel oil	0 L/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	0 Gi/año
Consumo neto de energía eléctrica	0 Gi/año
Consumo neto de energía	0 Gi/año

Emisiones					
		Reciclaje	Material virgen	Energía	Combustibles
		ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	0	0	0	0
	CH4	0,00	0,00	0,00	0,00
	N2O	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	SOx	0,00	0,00	0,00	0,00
	NOx	0,00	0,00	0,00	0,00
	HCl	0,00	0,00	0,00	0,00
	NH3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Hg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Emisiones al agua	DQO	0	0	0	0
	N total	0,000	0,000	0,000	0,000
	P total	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Hg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

COMENTARIOS

- Los valores de consumo de energía, gas-oil, gas natural, y de emisiones, tanto para el proceso de reciclaje como de fabricación de materiales vírgenes se basan en ton de los materiales finalmente producidos.
- Las emisiones no incluyen aquellas derivadas del consumo de energía y combustibles. Solo corresponden a las emisiones del proceso.
- La eficiencia de reciclaje se refiere a la cantidad de materiales reciclados obtenidos a partir de los residuos recuperados.

REFERENCIAS

- (a) RTI LCI_Report_OCR. (Papel 1º: 5.3-1; Papel 2º: 5.3-2; Vidrio 1º: 4-1; Vidrio 2º: 4-2; Metal Fe 1º: 7-2; Metal Fe 2º: 7-7; Metales no Fe 1º: 3-1; Metales no Fe 2º: 3-2; Plásticos Laminados 1º: 6-6; Plásticos Rígidos 1º: 6-10; Plásticos 2º: 6-13)
- (b) RTI LCI_Report_OCR.
- (c) RTI LCI_Report_OCR.
- (d) RTI LCI_Report_OCR. El consumo de carbón que indica la referencia está incorporado en el fuel oil como consumo equivalente de acuerdo al poder calorífico.
- (e) RTI LCI_Report_OCR.
- (f) RTI LCI_Report_OCR. El valor de CO2fósil para Papel 1º en realidad corresponde al secuestro de CO2 atmosférico en el crecimiento de los árboles utilizados en la fabricación del papel y no a emisionespropiamente.
- (g) RTI LCI_Report_OCR.

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Ingreso de residuos	
	ton/año
Fracción húmeda	0
Residuos Verdes	0
Total	0

Generación de biogás y biometano (a)	
Producción de biogás	126 m3/ton
Contenido de metano en el biogás	55 %

Consumo de energía (c)	
Consumo de energía eléctrica en el tratamiento	93 kWh/ton
Consumo de energía en la producción de fertilizantes	50,7 kWh/ton
Consumo de gas natural en la producción de fertilizantes	946 m3/ton

Factores de emisión (d)			
	Tratamiento biológico	Generación eléctrica	Fabricación fertilizantes
	g/ton	g/m3	g/ton
CO2 fósil			531.000
CH4			215
N2O			3.100
SOx		2,20E-02	
NOx		1,17	140
HCl		1,50E-02	
NH3	498,96		405
Dioxinas y furanos		3,30E-09	
Hg			
DQO	25		
N total	2,10		
P total	2,10		
Dioxinas y furanos			
Hg			

Generación de biogás	
Producción de biogás	0 m3/año
Utilización de biogás como combustible auxiliar en incineración	0,0 %
Consumo de biogás como combustible auxiliar en incineración	0 m3/año
Utilización de biogás para generación eléctrica	100,0 %
Desvío de biogás para generación eléctrica	0 m3/año
PCI Biogás	0,0209 GJ/m3
Eficiencia de generación de energía eléctrica	30 %
Generación de energía eléctrica	0 MWh/año

Generación de energía eléctrica	
Eficiencia de generación de energía eléctrica	30 %
Generación de energía eléctrica	0 MWh/año
Consumo de energía eléctrica en planta	0 MWh/año
Generación neta de energía eléctrica de exportación	0 MWh/año

Producción de compost (b)	
Producción de compost	42 %
Contenido de nitrógeno en el compost	1,1 %

Producción de compost	
Producción de compost	0 ton/año
Utilización de compost como bioabono	100 %
Generación de bioabono	0 ton/año
Equivalente de nitrógeno fertilizante	0 ton/año
Energía desplazada por sustitución de fertilizantes	0 MWh/año
Ahorro de gas natural por sustitución de fertilizantes	0 m3/año
Desvío de compost hacia sitio de disposición final	0 %
Desvío de compost hacia sitio de disposición final	0 ton/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	0 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	0 GJ/año
Consumo neto de energía	0 GJ/año

Emisiones					
	Tratamiento	Energía	Gas natural desplazado	Fertilizantes	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
CO2 fósil	0	0	0	0	0
CH4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N2O	0	0	0	0	0
SOx	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HCl	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
NH3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Hg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
DQO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N total	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00
P total	0,00	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0,00
Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Hg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

COMENTARIOS

REFERENCIAS

- (a) OWS-DRANCO Technology.
 (b) OWS-DRANCO Technology.
 (c) Tratamiento biológico: DRANCO System. Fertilizantes: Base de datos NREL.
 (d) Tratamiento biológico: RTI/EPA Compost Model OCR, Table 9. Generación eléctrica: McDougall, Tabla 21.6, B. Fertilizantes: Base de datos NREL.

DISPOSICIÓN FINAL

Ingreso de residuos	
	ton/año
Cenizas y lodos	0
Compost	0
Fracción mixta	700.000
Total	700.000

Generación de biogás (a)	
Generación de biogás por compost	0 m ³ /ton
Generación de biogás por fracción orgánica	250 m ³ /ton
Contenido de metano en el biogás	55 %

Consumo de energía y combustible (b)	
Consumo de energía eléctrica	0,15 kWh/m ³
Consumo de gas-oil	0,6 L/m ³

Factores de emisión (c)						
	Compost	Cenizas	Fracción mixta	Fugas	Quema en antorcha	Generación eléctrica
	g/ton	g/ton	g/ton	g/m ³	g/m ³	g/m ³
CO ₂ fósil				393		
CH ₄						
N ₂ O						
SO _x					0,05	2,20E-02
NO _x					0,2	1,17
HCl					0,03	1,50E-02
NH ₃						
Dioxinas y furanos					1,80E-10	3,30E-09
Hg					5,00E-05	
DQO	6	2,4	6			
N total	0,5	0,0005	0,5			
P total	0,5		0,5			
Dioxinas y furanos	3,00E-09	3,00E-10	3,00E-09			
Hg	5,00E-04	1,00E-04	5,00E-04			

Volumen ocupado en sitio de disposición final	
	m ³ /año
Total	1.000.000

Generación de biogás	
Producción de biogás	88.200.000 m ³ /año
Tasa de recolección de biogás	0 %
Fugas de biogás a la atmósfera	88.200.000 m ³ /año
Quema de biogás en antorcha	0 %
Quema de biogás en antorcha	0 m ³ /año
Utilización de biogás para generación eléctrica	100 %
Desvío de biogás para generación eléctrica	0 m ³ /año
PCI Biogás	0,0209 GJ/m ³
Eficiencia de generación de energía eléctrica	30 %
Generación de energía eléctrica	0 MWh/año

Consumo de energía y combustible	
Consumo de energía eléctrica en planta	150 MWh/año
Generación neta de energía eléctrica de exportación	0 MWh/año
Consumo de energía eléctrica de la red	150 MWh/año
Consumo de gas oil	600.000 L/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	23.193 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	540 GJ/año
Consumo neto de energía	23.733 GJ/año

Emisiones					
	SDF	Energía	Combustibles	Antorcha	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
CO ₂ fósil	0	7	2,094	0	2,101
CH ₄	34,672	0	0	0,00	34,672,00
N ₂ O	0	0	0	0	0
SO _x	0	0	15	0,00	14,96
NO _x	0	0	4	0,00	4,39
HCl	0	0	0	0,000	0,006
NH ₃	0	0	0	0,00	0,00
Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	1,80E-12	0,00E+00	1,80E-12
Hg	0,00E+00	0,00E+00	9,53E-05	0,00E+00	9,53E-05
DQO	4,20	0,00	0,06	-	4,26
N total	3,50E-01	2,56E-06	1,83E-04	-	3,51E-01
P total	3,50E-01	2,16E-07	3,60E-03	-	3,54E-01
Dioxinas y furanos	2,10E-09	0,00E+00	0,00E+00	-	2,10E-09
Hg	3,50E-04	4,87E-10	7,04E-09	-	3,50E-04

COMENTARIOS

- El consumo de energía eléctrica incluye el tratamiento de lixiviados.
- En las emisiones en el sitio de disposición final están incluidas las fugas de biogás.

REFERENCIAS

- (a) Generación de biogás: McDougall-White. p. 504-505. Contenido de metano: McDougall-White. p. 507.
- (b) McDougall-White. p. 501.
- (c) McDougall-White. Para emisiones líquidas se asume una generación de 150 L de lixiviados por ton de MSW (p. 511) y una composición según Tabla 21.7. Para emisiones al aire Tabla 21.5 y 21.6. Quema antorcha: McDougall, Tabla Z1.5 Alemania.

RESULTADOS

Emisiones							
	Recolección y transporte	Incineración	Plantas de clasificación	Reciclaje de materiales	Tratamiento biológico	Disposición final	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
CO2 fósil	9.161	0	0	0	0	2.101	11.262
CH4	1,36	0,00	0,00	0,00	0,00	34.672,00	34.673,36
N2O	0,0355	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0081	0,0436
SOx	65,03	0,00	0,00	0,00	0,00	14,96	79,99
NOx	19,02	0,00	0,00	0,00	0,00	4,39	23,40
HCl	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
NH3	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
Dioxinas y furanos	7,86E-12	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,80E-12	9,66E-12
Hg	4,17E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,53E-05	5,12E-04
DQO	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	4,26	4,54
N total	3,42E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,51E-01	3,54E-01
P total	1,58E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,54E-01	3,69E-01
Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,10E-09	2,10E-09
Hg	3,08E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,50E-04	3,50E-04

Indicadores							
	Recolección y transporte	Incineración	Plantas de clasificación	Reciclaje de materiales	Tratamiento biológico	Disposición final	Total
Volumen ocupado en SDF (m3/año)	-	-	-	-	-	-	1.000.000
Tasa global de recuperación de materiales (%)	-	-	-	-	-	-	0,0
Consumo de combustibles en transporte (tep/año)	-	-	-	-	-	-	2.425
Consumo de combustibles (tep/año)	2.425	0	0	0	0	554	2.979
Consumo de energía eléctrica (MWh/año)	-	0	0	0	0	150	150
Consumo neto de energía (GJ/año)	101.471	0	0	0	0	23.733	125.205
Emisión de dioxinas y furanos (kgPCDD-PCDF/año)	7,86E-09	0	0	0	0	2,10E-06	2,11E-06
Emisión de mercurio (kgHg/año)	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,86

Categorías de impacto							
	Recolección y transporte	Incineración	Plantas de clasificación	Reciclaje de materiales	Tratamiento biológico	Disposición final	Total
Calentamiento global (tonCO2eq/año)	9.200	0	0	0	0	730.216	739.416
Acidificación (tonSO2eq/año)	78,4	0,0	0,0	0,0	0,0	18,0	96,4
Eutrofización (tonPO4/año)	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	4,4

Poder de Calentamiento Global (a)	
(kgCO2eq/kg)	
CO2	1
CH4	21
N2O	310

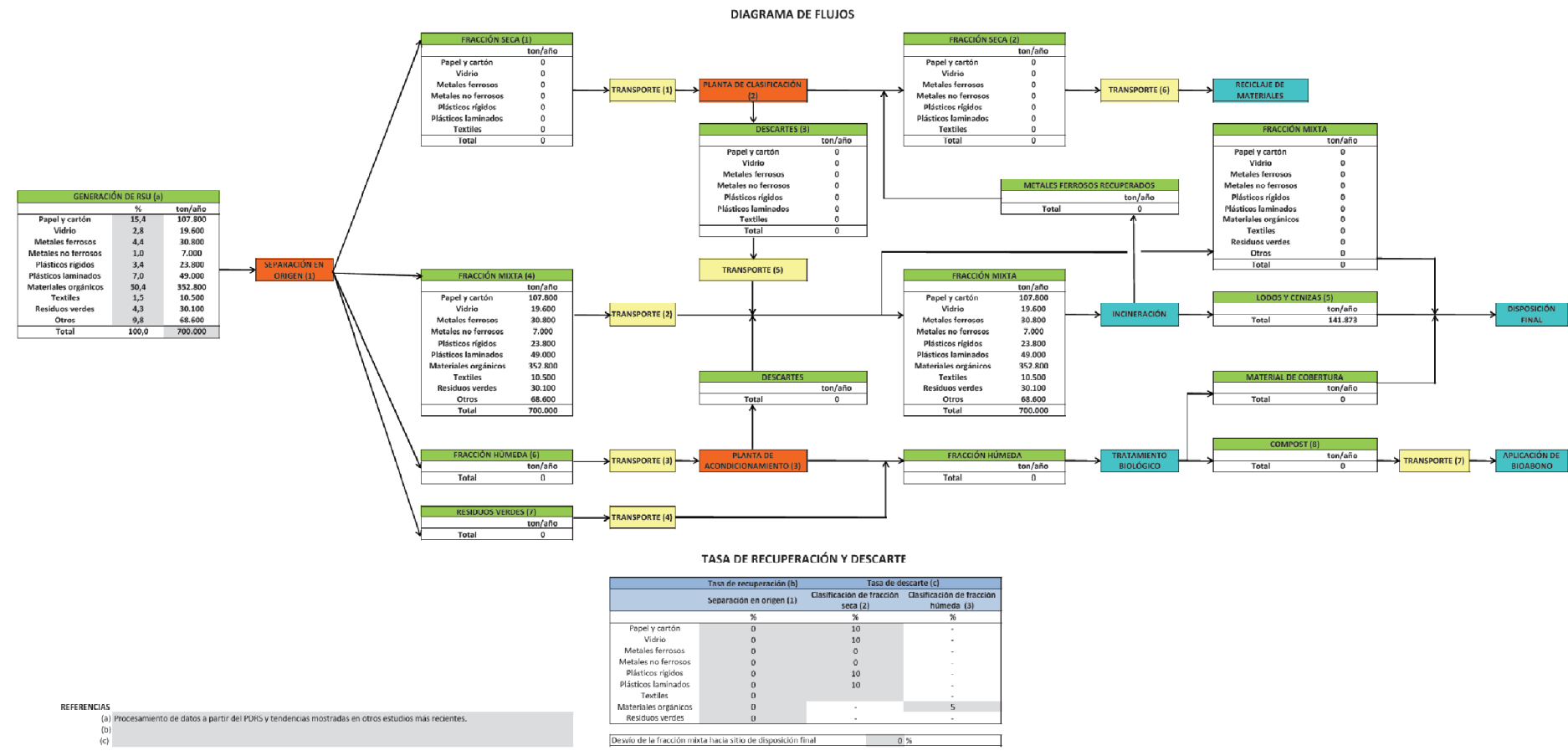
Poder de acidificación (b)	
(kgSO2eq/kg)	
SO2	1
NOx	0,7
HCl	0,88
NH3	1,88

Poder de acidificación (b)		
(kgSO2eq/kg)		
Emisiones al aire	NH3	0,35
	NOx	0,13
Emisiones al agua	N	0,42
	P	3,06
	DQO	0,022

REFERENCIAS

- (a) Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC)
 (b) Guinée, 2004, Table 4.3.10.2 - Heijungs (Backgrounds)
 (c) Guinée, 2004, Table 4.3.11.1 - Heijungs et al (Backgrounds)

III.2 S1_EP



REFERENCIAS

(a) Procesamiento de datos a partir del PDHS y tendencias mostradas en otros estudios más recientes.

(b)

(c)

PESOS ESPECÍFICOS

	FRACCIÓN SECA (1)		FRACCIÓN SECA (2)		DESCARTES (3)	
	Materiales sueltos (a)		Materiales compactados (b)		Materiales sueltos (c)	
	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3
Papel y cartón	0	89	0	131	0	89
Vidrio	0	196	0	481	0	196
Metales ferrosos	0	89	0	160	0	89
Metales no ferrosos	0	160	0	240	0	160
Plásticos rígidos	0	65	0	131	0	65
Plásticos laminados	0	65	0	131	0	65
Materiales orgánicos	-	-	-	-	-	-
Textiles	0	65	0	101	0	65
Residuos verdes	-	-	-	-	-	-
Otros	-	-	-	-	-	-
Escorias y cenizas	-	-	-	-	-	-
Compost	-	-	-	-	-	-
Total	0	#iDIV/0!	0	#iDIV/0!	0	#iDIV/0!

	FRACCIÓN MIXTA (4)		ESCORIA, CENIZAS Y LODOS (5)		FRACCIÓN HÚMEDA (6)	
	Materiales compactados (d)		(e)		Materiales compactados (f)	
	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3
Papel y cartón	107.800	451	-	-	-	-
Vidrio	19.600	451	-	-	-	-
Metales ferrosos	30.800	451	-	-	-	-
Metales no ferrosos	7.000	451	-	-	-	-
Plásticos rígidos	23.800	451	-	-	-	-
Plásticos laminados	49.000	451	-	-	-	-
Materiales orgánicos	352.800	451	-	-	0	451
Textiles	10.500	451	-	-	-	-
Residuos verdes	30.100	451	-	-	-	-
Otros	68.600	451	-	-	-	-
Escorias y cenizas	-	-	141.873	950	-	-
Compost	-	-	-	-	-	-
Total	700.000	451	141.873	950	0	451

	RESIDUOS VERDES (7)		COMPOST (8)		RESIDUOS EN DISPOSICIÓN FINAL	
	Materiales sueltos (g)		Materiales a granel (g)		Materiales compactados (h)	
	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3
Papel y cartón	-	-	-	-	0	700
Vidrio	-	-	-	-	0	700
Metales ferrosos	-	-	-	-	0	700
Metales no ferrosos	-	-	-	-	0	700
Plásticos rígidos	-	-	-	-	0	700
Plásticos laminados	-	-	-	-	0	700
Materiales orgánicos	-	-	-	-	0	700
Textiles	-	-	-	-	0	700
Residuos verdes	0	101	-	-	0	700
Otros	-	-	-	-	0	700
Escorias y cenizas	-	-	-	-	141.873	700
Compost	-	-	0	326	0	700
Total	0	101	0	326	141.873	700

REFERENCIAS

- (a) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (b) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (c) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1. En este caso coincide con la Fracción Seca (1) por la forma en que son transportados.
- (d) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (e) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (f) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (g) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (h) CEMPRE

ENERGÍA Y COMBUSTIBLES

Matriz de generación de energía eléctrica (a)	
	%
Generación hidráulica	51,0
Generación eólica	24,0
Generación térmica fuel-oil	1,0
Generación térmica gas oil	
Generación térmica gas natural	6,0
Generación térmica biomasa	18,0
Total	100

Factores emisión por uso de combustibles fósiles (b)				
		Gas natural	Gas oil	Fuel oil
		g/m3	g/L	g/L
Emisiones al aire	CO2 fósil	2189,5	3489,8	3385,5
	CH4	6,09	0,52	0,56
	N2O	1,92E-04	1,35E-02	1,35E-02
	SOx	31,57	24,77	23,25
	NOx	8,17	7,24	5,30
	HCl	1,57E-03	3,00E-03	8,47E-02
	NH3	4,82E-02	4,79E-03	2,13E-01
	Dioxinas y furanos	1,76E-12	3,00E-12	3,15E-10
	Hg	1,20E-06	1,59E-04	1,05E-05
Emisiones al agua	DQO	0,69	0,10	0,11
	N total	7,34E-04	1,30E-03	1,40E-03
	P total	5,75E-05	6,00E-03	1,49E-04
	Dioxinas y furanos			
	Hg	1,76E-07	1,17E-08	1,32E-08

Factores emisión para la generación eléctrica (c)						
		Térmica fuel oil	Térmica gas oil	Térmica gas natural	Biomasa	Total
		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Emisiones al aire	CO2 fósil	898,5	1236,6	665,3	0,0	48,9
	CH4	0,15	0,18	1,85	0,00	0,11
	N2O					0,00E+00
	SOx	6,18	8,78	9,58	0,03	0,64
	NOx	1,41	2,56	2,48	0,65	0,28
	HCl	2,25E-02	1,06E-03	4,79E-01	0,00E+00	2,90E-02
	NH3	5,64E-02	1,70E+00	1,47E-02		1,44E-03
	Dioxinas y furanos					0,00E+00
	Hg					0,00E+00
Emisiones al agua	DQO	0,03	0,04	0,21	0,00	0,01
	N total	3,72E-04	4,62E-04	2,23E-04		1,71E-05
	P total	3,95E-05	2,13E-03	1,74E-05		1,44E-06
	Dioxinas y furanos					0,00
	Hg	3,50E-09	4,16E-09	5,35E-08	0,00E+00	3,25E-09

Energía térmica de combustibles (d)	
Gas oil	0,0387 GJ/L
Fuel oil	0,0417 GJ/L
Gas natural	0,0381 GJ/m3
Biomasa	0,0241 GJ/kg

COMENTARIOS

- Se considera que las emisiones asociadas a la energía desplazada en las distintas operaciones unitarias se reparten de acuerdo a la matriz de generación
- Los factores de emisión por uso de combustible incluyen la producción y consumo.

REFERENCIAS

- (a) Promedio 2008/2012. DNE: <http://www.dne.gub.uy/-/series-estadisticas-de-energia-electrica->
- (b) EPA-RTI. Energy model, Appendix C Table 1 (1999)
- (c) EPA-RTI. Energy model, Appendix B Table 1 (1999)
- (d) EPA-RTI. Energy model, Table 3-7 (1999)

RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE

Consumos específicos de combustible (a)	
Camión abierto en ciudad	40 L/100km
Camión abierto en media distancia	30 L/100km
Camión compactador	0,15 L/(km.ton)

Capacidad de carga del camión (b)	
Camión abierto	20 m3
Camión compactador	10 ton

Transporte de la fracción seca separada en origen hacia plantas de clasificación (1)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	10 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de la fracción mixta hacia planta de incineración o SDF (2)	
Tipo de vehículo	Camión compactador
Cantidad de residuos transportados	700.000 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	25 km
Consumo de combustible	2.625.000 L/año

Transporte de la fracción húmeda hacia planta de tratamiento biológico (3)	
Tipo de vehículo	Camión compactador
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	25 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de residuos verdes hacia planta de tratamiento biológico (4)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	30 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de descartes hacia planta de incineración (5)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	15 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de materiales clasificados hacia plantas de reciclaje (6)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	50 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de compost hacia sitios de aplicación (7)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	50 km
Consumo de combustible	0 L/año

Consumo de combustible	
Consumo total de combustible	2.625.000 L/año
Consumo específico de combustible	3,75 L/ton

Balance de energía	
Consumo neto de combustibles	101.471 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	n/c GJ/año
Consumo neto de energía	101.471 GJ/año

Emisiones		
		ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	9.161
	CH4	1,36
	N2O	0,0355
	SOx	65,03
	NOx	19,02
	HCl	0,01
	NH3	0,01
	Dioxinas y furanos	7,86E-12
	Hg	4,17E-04
	DQO	0,27
Emisiones al agua	N total	3,42E-03
	Ptotal	1,58E-02
	Dioxinas y furanos	0,00E+00
	Hg	3,08E-08

COMENTARIOS

· Se considera que cada una de las fracciones son recolectadas mediante el mismo sistema en todos los circuitos, lo cual no es necesariamente cierto si se consideran circuitos suburbanos y rurales, y otras situaciones particulares.

· Se considera que el transporte de la fracción mixta es el mismo si esta es dirigida a la planta de incineración como al sitio de disposición final (Transporte 2), por lo que no se diferencian.

· En el consumo total de combustible está incluido el transporte de todas las corrientes (descartes, materiales clasificados, compost, etc.) y no solo de los residuos generados.

· El consumo específico de combustible está basado en la cantidad de residuos generados.

REFERENCIAS

(a) McDougall-White, p. 419 (consumos para camión abierto).

(b)

INCINERACIÓN

Ingreso de residuos	
	ton/año
Papel y cartón	107.800
Vidrio	19.600
Metales ferrosos	30.800
Metales no ferrosos	7.000
Plásticos rígidos	23.800
Plásticos laminados	49.000
Materiales orgánicos	352.800
Textiles	10.500
Residuos verdes	30.100
Otros	68.600
Total	700.000

Eficiencia en la generación de energía (a)	
Eficiencia de conversión de la energía	28 %
Consumo de energía en la planta de incineración	15 %
Consumo de gas natural como combustible auxiliar	0,23 m3/ton

Factores de emisión por combustión de materiales (b)									
	Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles	Orgánicos	Otros
	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
CO2 fósil		15,422	43,546	43,999	2,643.581	2,745.187	1,280.000		1,280.000
CH4	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36		1,36	
N2O									
SOx	381,02	6,08	14,15	14,29	1,156,36	1,112,77	118,00	162,48	118,00
NOx	892,98	14,28	33,12	33,46	2,710,21	2,608,04	946,00	380,77	946,00
HCl	181,08	2,89	6,72	6,79	549,57	528,85	75,00	77,21	75,00
NH3									
Dioxinas y furanos	2,25E-05	1,02E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,69E-04	3,50E-04	2,33E-05	1,08E-05	2,33E-05
Hg	1,72E-02	6,62E-03	1,92E-02	2,62E-02	6,62E-03	2,36E-01	5,55E-02	9,93E-03	5,55E-02
DQO									
N total									
P total									
Dioxinas y furanos									
Hg									
Residuos sólidos	84.000	900.000	850.000	900.000	900.000	60.000	77.000	75.000	420.000

Factores de emisión en la fabricación de insumos (c)			
	Cal	Amoniaco	Carbón activado
	g/ton	g/ton	g/ton
CO2 fósil	3,322		
CH4	856,09		
N2O			
SOx	0,00		
NOx	0,00		
HCl	1,169,14		
NH3	0,18		
Dioxinas y furanos			
Hg	3,90E-03		
DQO	14,37		
N total	4,13E-02		
P total	5,72E-01		
Dioxinas y furanos			
Hg	3,57E-06		
Energía (kWh/ton)	1489,17		
Factor de utilización (ton/ton)	0,0071	0,0015	

Poder calorífico inferior (d)	
	MI/ton
Papel y cartón	16.300
Vidrio	200
Metales ferrosos	700
Metales no ferrosos	700
Plásticos rígidos	32.600
Plásticos laminados	32.600
Materiales orgánicos	4.700
Textiles	17.500
Residuos verdes	18.700
Otros	13.778
Total	10.790

Generación de energía	
Energía contenida en los residuos	7.510.736 GJ/año
Generación total de energía eléctrica	584.168 MWh/año
Potencia total de generación	66,7 MW
Consumo de energía eléctrica en planta	87.625 MWh/año
Potencia consumida en planta	10,0 MW
Generación neta de energía eléctrica de exportación	496.543 MWh/año
Potencia neta de generación	56,7 MW

Consumo de combustible auxiliar	
Requerimiento de gas natural como combustible auxiliar	161.000 m3/año
Utilización de biogas como combustible auxiliar	100 %
Consumo de biogas del tratamiento biológico	0 m3/año
Consumo de gas natural de la red	161.000 m3/año

Consumo de insumos	
Consumo de cal	4.970 ton/año
Consumo de amoníaco	1.050 ton/año
Consumo de carbón activado	0 ton/año

Recuperación de metales ferrosos	
Tasa de recuperación de metales ferrosos	0 %
Metales ferrosos recuperados	0 ton/año

Generación de lodos y cenizas	
Generación de lodos y cenizas	141.873 ton/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	6.129 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	-1.760.911 GJ/año
Consumo neto de energía	-1.754.782 GJ/año

Emisiones					
		Combustible		Insumos	Total
		Incineración	Energía auxiliar		
		ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	300,631	-74,787	17	276,718
	CH4	0,84	-55,77	0,98	-49,69
	N2O	0,00E+00	0,00E+00	3,09E-05	3,09E-05
	SOx	195,32	-319,31	0,00	-118,90
	NOx	510,72	-138,63	1,32	373,41
	HCl	94,42	-14,49	0,00	85,74
	NH3	0,00	-0,72	0,01	-0,71
	Dioxinas y furanos	2,96E-05	0,00E+00	2,84E-13	2,96E-05
	Hg	2,27E-02	0,00E+00	1,94E-07	2,27E-02
	DQO	0,00	-6,37	0,11	-6,19
Emisiones al agua	N total	0,00	-0,01	0,00	-0,01
	P total	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dioxinas y furanos	0	0	0	0
	Hg	0,00E+00	-1,61E-06	2,84E-08	-1,57E-06

COMENTARIOS

- Toda la energía recuperada es utilizada para la generación de energía eléctrica, parte de la cual es utilizada en el proceso y el resto se exporta a la red.
- El gas natural utilizado como combustible auxiliar se considera 100 % CH4.
- La generación de cenizas y lodos de tratamiento incluye las cenizas de fondo y cenizas volátiles.

REFERENCIAS

- Eficiencia de conversión y consumos de energía en planta: Themelis-Díaz, 2012; consumo de gas natural: McDougall.
- RTI Input_Document_OCR Tabla 7.6. Los Factores para Textiles y Otros, y todos los valores para dioxinas y furanos y residuos sólidos de McDougall-White Tabla 20.4.
- RTI Input_Document_OCR Tabla 7.6.
- Themelis-Díaz, 2012.

PLANTA DE CLASIFICACIÓN

Flujo de residuos	
	ton/año
Ingreso total de residuos	0
Descarte total de residuos	0

Consumo de energía eléctrica y combustible (a)	
Consumo de energía eléctrica	8 kWh/ton
Consumo de gas oil	0,1 L/ton

Consumo de energía eléctrica y combustible	
Consumo de energía eléctrica	0 MWh/año
Consumo de gas oil	0 L/año

Balance de energía	
Consumo neto de combustibles	0 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	0 GJ/año
Consumo neto de energía	0 GJ/año

Emisiones		
		ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	0
	CH4	0,00
	N2O	0,0000
	SOx	0,00
	NOx	0,00
	HCl	0,00
	NH3	0,00
	Dioxinas y furanos	0,00E+00
	Hg	0,00E+00
	DCO	0,00
Emisiones al agua	N total	0,00E+00
	P total	0,00E+00
	Dioxinas y furanos	0,00E+00
	Hg	0,00E+00

COMENTARIOS

REFERENCIAS

(a) McDougall-White (2004), RTI Input_Document_OCR Table 4.5.

RECICLAJE DE MATERIALES

Ingreso de residuos	
	ton/año
Papel y cartón	0
Vidrio	0
Metales ferrosos	0
Metales no ferrosos	0
Plásticos rígidos	0
Plásticos laminados	0
Textiles	0
Total	0

Consumo de energía eléctrica (a)		Consumo de gas oil (b)		Consumo de gas natural (c)		Consumo de fuel oil (d)		
Material virgen	Reciclaje	Material virgen	Reciclaje	Material virgen	Reciclaje	Material virgen	Reciclaje	
kWh/ton	kWh/ton	L/ton	L/ton	m3/ton	m3/ton	L/ton	L/ton	
Papel y cartón	3.110	1.216	25	4	359	241	26	8
Vidrio	64	22	17	9	145	101	13	1
Metales ferrosos			57	18	405	128	714	229
Metales no ferrosos	20.592	907	98	33	758	119	477	5
Plásticos rígidos	433	689		9	339	26	315	9
Plásticos laminados	479	689		9	401	26	304	9
Textiles								

Factores de emisión en proceso de reciclaje (e)								
		Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles
		g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
Emisiones al aire	CO2 fósil			539,784	82,555	157,399	157,399	
	CH4			1.170,29				
	N2O							
	SOx	0,01	453,60	2.707,99	13,61	852,77	852,77	
	NOx	0,59		1.601,21	14.560,56	1.642,03	1.642,03	
	HCl			81,19	158,76	0,14	0,14	
	NH3							
	Dioxinas y furanos							
Hg	0,01							
Emisiones al agua	DQO	4,944			68	274	274	
	N total			0,73	308,45	0,06	0,06	
	P total			1,12	0,83	0,00635	0,00635	
	Dioxinas y furanos							
	Hg	1,45E-05			2,49E-05	3,59E-06	3,59E-06	

Factores de emisión en fabricación del material virgen (f)								
		Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles
		g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
Emisiones al aire	CO2 fósil	0	161.482	1.651.104	1.705.536	1.964.088	2.004.912	
	CH4			2.095,63	557,93			
	N2O				2,00			
	SOx	599	454	4.627	17.917	21.591	6.895	
	NOx	304		2.504	14.833	17.781	10.251	
	HCl			61,7	49,9	99,8	63,5	
	NH3				9,53			
	Dioxinas y furanos							
	Hg	9,07E-03			7,26E-02			
Emisiones al agua	DQO	712			490	2.994	1.361	
	N total			43,39	2,95	-0,0121	3,51	
	P total			0,186	4,00E-03	2,962	1,48	
	Dioxinas y furanos							
	Hg	2,49E-05			2,68E-03			

Eficiencia de reciclaje (g)	
	%
Papel y cartón	94,3
Vidrio	97,1
Metales ferrosos	84,0
Metales no ferrosos	93,5
Plásticos rígidos	86,2
Plásticos laminados	86,2
Textiles	

Consumo de energía y combustibles	
Consumo neto de energía eléctrica	0 MWh/año
Consumo neto de gas oil	0 L/año
Consumo neto de gas natural	0 m3/año
Consumo neto de fuel oil	0 L/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	0 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	0 GJ/año
Consumo neto de energía	0 GJ/año

Emisiones					
		Reciclaje	Material virgen	Energía	Combustibles
		ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	0	0	0	0
	CH4	0,00	0,00	0,00	0,00
	N2O	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	SOx	0,00	0,00	0,00	0,00
	NOx	0,00	0,00	0,00	0,00
	HCl	0,00	0,00	0,00	0,00
	NH3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Hg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Emisiones al agua	DQO	0	0	0	0
	N total	0,000	0,000	0,000	0,000
	P total	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Hg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

COMENTARIOS

- Los valores de consumo de energía, gas-oil, gas natural, y de emisiones, tanto para el proceso de reciclaje como de fabricación de materiales vírgenes se basan en ton de los materiales finalmente producidos.
- Las emisiones no incluyen aquellas derivadas del consumo de energía y combustibles. Solo corresponden a las emisiones del proceso.
- La eficiencia de reciclaje se refiere a la cantidad de materiales reciclados obtenidos a partir de los residuos recuperados.

REFERENCIAS

- (a) RTI LCI_Report_OCR. (Papel 1º: 5.3-1; Papel 2º: 5.3-2; Vidrio 1º: 4-1; Vidrio 2º: 4-2; Metal Fe 1º: 7-2; Metal Fe 2º: 7-7; Metales no Fe 1º: 3-1; Metales no Fe 2º: 3-2; Plásticos Laminados 1º: 6-6; Plásticos Rígidos 1º: 6-6)
- (b) RTI LCI_Report_OCR.
- (c) RTI LCI_Report_OCR.
- (d) RTI LCI_Report_OCR. El consumo de carbón que indica la referencia está incorporado en el fuel oil como consumo equivalente de acuerdo al poder calorífico.
- (e) RTI LCI_Report_OCR.
- (f) RTI LCI_Report_OCR. El valor de CO2fósil para Papel 1º en realidad corresponde al secuestro de CO2 atmosférico en el crecimiento de los árboles utilizados en la fabricación del papel y no a emisionespropiamente.
- (g) RTI LCI_Report_OCR.

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Ingreso de residuos	
	ton/año
Fracción húmeda	0
Residuos Verdes	0
Total	0

Generación de biogás y biometano (a)	
Producción de biogás	126 m3/ton
Contenido de metano en el biogás	55 %

Consumo de energía (c)	
Consumo de energía eléctrica en el tratamiento	93 kWh/ton
Consumo de energía en la producción de fertilizantes	50,7 kWh/ton
Consumo de gas natural en la producción de fertilizantes	946 m3/ton

Factores de emisión (d)			
		Generación eléctrica	Fabricación fertilizantes
		g/ton	g/ton
Emisiones al aire	CO2 fósil		531.000
	CH4		215
	N2O		3.100
	SOx	2,20E-02	
	NOx	1,17	140
	HCl	1,50E-02	
	NH3		405
	Dioxinas y furanos	3,30E-09	
	Hg		
	DQO	25	
Emisiones al agua	N total	2,10	
	P total	2,10	
	Dioxinas y furanos		
	Hg		

Generación de biogás	
Producción de biogás	0 m3/año
Utilización de biogás como combustible auxiliar en incineración	0,0 %
Consumo de biogás como combustible auxiliar en incineración	0 m3/año
Utilización de biogás para generación eléctrica	100,0 %
Desvío de biogás para generación eléctrica	0 m3/año
PCI Biogás	0,0209 GJ/m3
Eficiencia de generación de energía eléctrica	30 %
Generación de energía eléctrica	0 MWh/año

Generación de energía eléctrica	
Eficiencia de generación de energía eléctrica	30 %
Generación de energía eléctrica	0 MWh/año
Consumo de energía eléctrica en planta	0 MWh/año
Generación neta de energía eléctrica de exportación	0 MWh/año

Producción de compost (b)	
Producción de compost	42 %
Contenido de nitrógeno en el compost	1,1 %

Producción de compost	
Producción de compost	0 ton/año
Utilización de compost como bioabono	100 %
Generación de bioabono	0 ton/año
Equivalente de nitrógeno fertilizante	0 ton/año
Energía desplazada por sustitución de fertilizantes	0 MWh/año
Ahorro de gas natural por sustitución de fertilizantes	0 m3/año
Desvío de compost hacia sitio de disposición final	0 %
Desvío de compost hacia sitio de disposición final	0 ton/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	0 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	0 GJ/año
Consumo neto de energía	0 GJ/año

Emisiones					
	Tratamiento	Energía	Gas natural desplazado	Fertilizantes	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	0	0	0	0
	CH4	0,00	0,00	0,00	0,00
	N2O	0	0	0	0
	SOx	0,00	0,00	0,00	0,00
	NOx	0,00	0,00	0,00	0,00
	HCl	0,000	0,000	0,000	0,000
	NH3	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Hg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	DQO	0,00	0,00	0,00	0,00
Emisiones al agua	N total	0	0	0,00E+00	0,00E+00
	P total	0,00	0,00	0,00E+00	0,00E+00
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Hg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

COMENTARIOS

REFERENCIAS

- (a) OWS-DRANCO Technology.
 (b) OWS-DRANCO Technology.
 (c) Tratamiento biológico: DRANCO System. Fertilizantes: Base de datos NREL.
 (d) Tratamiento biológico: RTI/EPA Compost Model OCR, Table 9. Generación eléctrica: McDougall, Tabla 21.6, B. Fertilizantes: Base de datos NREL.

DISPOSICIÓN FINAL

Ingreso de residuos	
	ton/año
Cenizas y lodos	141.873
Compost	0
Fracción mixta	0
Total	141.873

Generación de biogás (a)	
Generación de biogás por compost	0 m³/ton
Generación de biogás por fracción orgánica	250 m³/ton
Contenido de metano en el biogás	55 %

Consumo de energía y combustible (b)	
Consumo de energía eléctrica	0,15 kWh/m³
Consumo de gas-oil	0,6 L/m³

Factores de emisión (c)					
	Compost	Cenizas	Fracción mixta	Fugas	Quema en antorcha
	g/ton	g/ton	g/ton	g/m³	g/m³
Emissiones al aire					
CO2 fósil				393	
CH4					
N2O					
SOx					0,05
NOx					1,17
HCl					0,03
NH3					
Dioxinas y furanos					1,80E-10
Hg					5,00E-05
Emissiones al agua					
DQO	6	2,4	6		
N total	0,5	0,0005	0,5		
P total	0,5		0,5		
Dioxinas y furanos	3,00E-09	3,00E-10	3,00E-09		
Hg	5,00E-04	1,00E-04	5,00E-04		

Volumen ocupado en sitio de disposición final	
	m³/año
Total	202.676

Generación de biogás	
Producción de biogás	0 m³/año
Tasa de recolección de biogás	0 %
Fugas de biogás a la atmósfera	0 m³/año
Quema de biogás en antorcha	0 %
Quema de biogás en antorcha	0 m³/año
Utilización de biogás para generación eléctrica	100 %
Desvío de biogás para generación eléctrica	0 m³/año
PCI Biogás	0,0209 GJ/m³
Eficiencia de generación de energía eléctrica	30 %
Generación de energía eléctrica	0 MWh/año

Consumo de energía y combustible	
Consumo de energía eléctrica en planta	30 MWh/año
Generación neta de energía eléctrica de exportación	0 MWh/año
Consumo de energía eléctrica de la red	30 MWh/año
Consumo de gas oil	121.606 L/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	4.701 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	109 GJ/año
Consumo neto de energía	4.810 GJ/año

Emisiones					
	SDF	Energía	Combustibles	Antorcha	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emissiones al aire					
CO2 fósil	0	1	424	0	426
CH4	0	0	0	0,00	0,07
N2O	0	0	0	0	0
SOx	0	0	3	0,00	3,03
NOx	0	0	1	0,00	0,89
HCl	0	0	0	0,000	0,001
NH3	0	0	0	0,00	0,00
Dioxinas y furanos	0	0	0	0,00E+00	3,64E-13
Hg	0	0	0	0,00E+00	1,93E-05
Emissiones al agua					
DQO	0,34	0,00	0,01	-	0,35
N total	7,09E-05	5,20E-07	1,59E-04	-	2,30E-04
P total	0,00E+00	4,38E-08	7,30E-04	-	7,30E-04
Dioxinas y furanos	4,26E-11	0,00E+00	0,00E+00	-	4,26E-11
Hg	1,42E-05	9,87E-11	1,43E-09	-	1,42E-05

COMENTARIOS

- El consumo de energía eléctrica incluye el tratamiento de lixiviados.
- En las emisiones en el sitio de disposición final están incluidas las fugas de biogás.

REFERENCIAS

- Generación de biogás: McDougall-White. p. 504-505. Contenido de metano: McDougall-White. p. 507.
- McDougall-White. p. 501.
- McDougall-White. Para emisiones líquidas se asume una generación de 150 L de lixiviados por ton de MSW (p. 511) y una composición según Tabla 21.7. Para emisiones al aire Tabla 21.5 y 21.6. Quema antorcha: McDougall, Tabla 21.5 Alemania.

RESULTADOS

Emisiones							
	Recolección y transporte	Incineración	Plantas de clasificación	Reciclaje de materiales	Tratamiento biológico	Disposición final	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	9.161	276.718	0	0	426	286.304
	CH4	1,36	-49,69	0,00	0,00	0,07	-48,26
	N2O	0,0355	0,0000	0,0000	0,0000	0,0016	0,0371
	SOx	65,03	-118,90	0,00	0,00	3,03	-50,83
	NOx	19,02	373,41	0,00	0,00	0,89	393,31
	HCl	0,01	85,74	0,00	0,00	0,00	85,75
	NH3	0,01	-0,71	0,00	0,00	0,00	-0,69
	Dioxinas y furanos	7,86E-12	2,96E-05	0,00E+00	0,00E+00	3,64E-13	2,96E-05
	Hg	4,17E-04	2,27E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,93E-05	2,31E-02
	DQO	0,27	-6,19	0,00	0,00	0,35	-5,56
Emisiones al agua	N total	3,42E-03	-8,16E-03	0,00E+00	0,00E+00	2,30E-04	-4,51E-03
	P total	1,58E-02	2,13E-03	0,00E+00	0,00E+00	7,30E-04	1,86E-02
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,26E-11	4,26E-11
	Hg	3,08E-08	-1,57E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,42E-05	1,27E-05

Indicadores							
	Recolección y transporte	Incineración	Plantas de clasificación	Reciclaje de materiales	Tratamiento biológico	Disposición final	Total
Volumen ocupado en SDF (m3/año)	-	-	-	-	-	-	202.676
Tasa global de recuperación de materiales (%)	-	-	-	-	-	-	0,0
Consumo de combustibles en transporte (tep/año)	-	-	-	-	-	-	2.425
Consumo de combustibles (tep/año)	2.425	146	0	0	0	112	2.684
Consumo de energía eléctrica (MWh/año)	-	-489.142	0	0	0	30	-489.111
Consumo neto de energía (GJ/año)	101.471	-1.754.782	0	0	0	4.810	-1.648.500
Emisión de dioxinas y furanos (kgPCDD-PCDF/año)	7,86E-09	0,029596042	0	0	0	4,29E-08	2,96E-02
Emisión de mercurio (kgHg/año)	0,42	22,69	0,00	0,00	0,00	0,03	23,14

Categorías de impacto							
	Recolección y transporte	Incineración	Plantas de clasificación	Reciclaje de materiales	Tratamiento biológico	Disposición final	Total
Calentamiento global (tonCO2eq/año)	9.200	275.674	0	0	0	428	285.302
Acidificación (tonSO2eq/año)	78,4	216,6	0,0	0,0	0,0	3,7	298,6
Eutrofización (tonPO4/año)	2,5	48,2	0,0	0,0	0,0	0,1	50,8

Poder de Calentamiento Global (a)	
(kgCO ₂ -eq/kg)	
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310

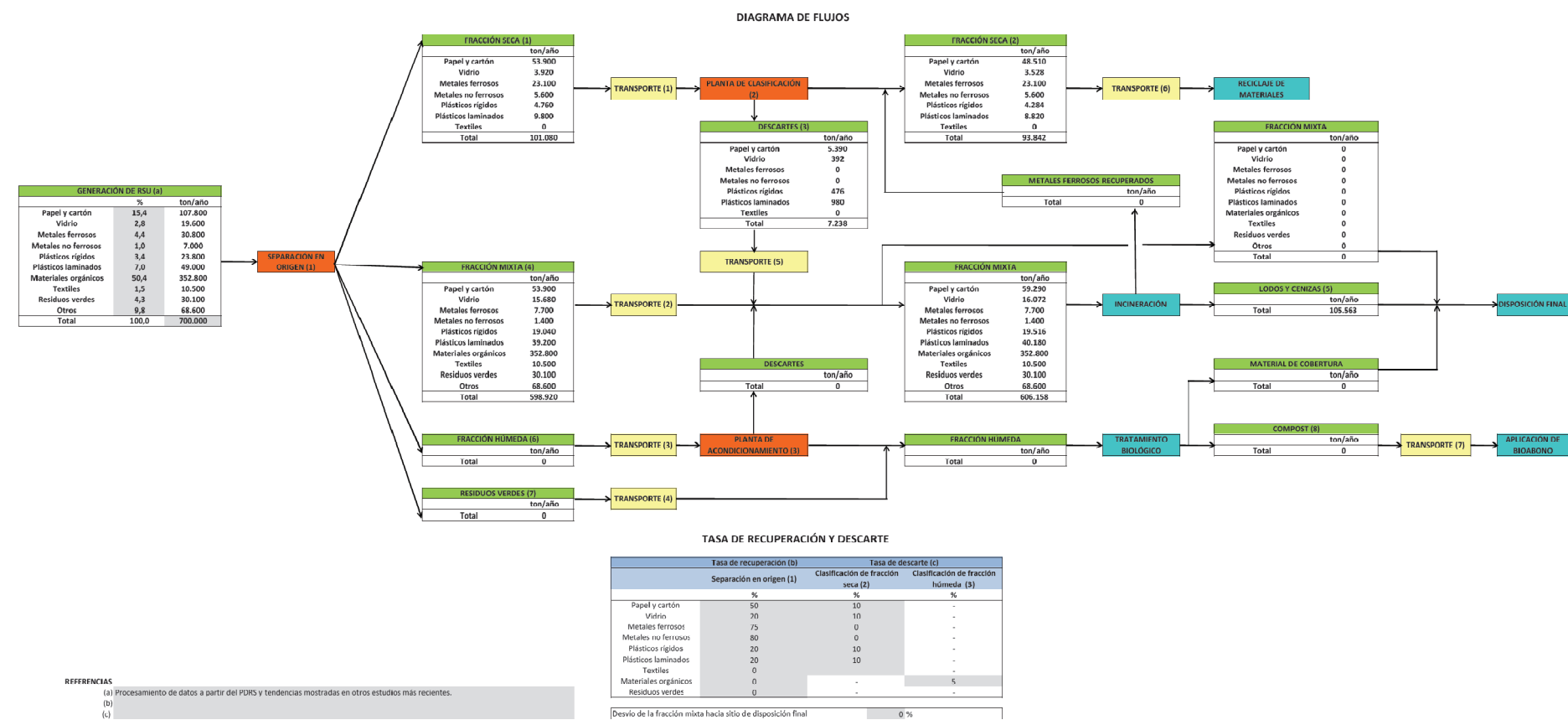
Poder de acidificación (b)	
(kgSO ₂ -eq/kg)	
SO ₂	1
NO _x	0,7
HCl	0,88
NH ₃	1,88

Poder de acidificación (b)		
(kgSO ₂ -eq/kg)		
Emisiones al aire	NH ₃	0,35
	NO _x	0,13
Emisiones al agua	N	0,42
	P	3,06
	DQO	0,022

REFERENCIAS

- (a) Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC)
 (b) Guinée, 2004, Table 4.3.10.2 - Heijungs (Backgrounds)
 (c) Guinée, 2004, Table 4.3.11.1 - Heijungs et al (Backgrounds)

III.3 S2_EP



PESOS ESPECÍFICOS

	FRACCIÓN SECA (1)		FRACCIÓN SECA (2)		DESCARTES (3)	
	Materiales sueltos (a)		Materiales compactados (b)		Materiales sueltos (c)	
	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3
Papel y cartón	53.900	89	48.510	131	5.390	89
Vidrio	3.920	196	3.528	481	392	196
Metales ferrosos	23.100	89	23.100	160	0	89
Metales no ferrosos	5.600	160	5.600	240	0	160
Plásticos rígidos	4.760	65	4.284	131	476	65
Plásticos laminados	9.800	65	8.820	131	980	65
Materiales orgánicos	-	-	-	-	-	-
Textiles	0	65	0	101	0	65
Residuos verdes	-	-	-	-	-	-
Otros	-	-	-	-	-	-
Escorias y cenizas	-	-	-	-	-	-
Compost	-	-	-	-	-	-
Total	101.080	94	93.842	158	7.238	90

	FRACCIÓN MIXTA (4)		ESCORIA, CENIZAS Y LODOS (5)		FRACCIÓN HÚMEDA (6)	
	Materiales compactados (d)		(e)		Materiales compactados (f)	
	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3
Papel y cartón	53.900	451	-	-	-	-
Vidrio	15.680	451	-	-	-	-
Metales ferrosos	7.700	451	-	-	-	-
Metales no ferrosos	1.400	451	-	-	-	-
Plásticos rígidos	19.040	451	-	-	-	-
Plásticos laminados	39.200	451	-	-	-	-
Materiales orgánicos	352.800	451	-	-	0	451
Textiles	10.500	451	-	-	-	-
Residuos verdes	30.100	451	-	-	-	-
Otros	68.600	451	-	-	-	-
Escorias y cenizas	-	-	105.563	950	-	-
Compost	-	-	-	-	-	-
Total	598.920	451	105.563	950	0	451

	RESIDUOS VERDES (7)		COMPOST (8)		RESIDUOS EN DISPOSICIÓN FINAL	
	Materiales sueltos (g)		Materiales a granel (g)		Materiales compactados (h)	
	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3
Papel y cartón	-	-	-	-	0	700
Vidrio	-	-	-	-	0	700
Metales ferrosos	-	-	-	-	0	700
Metales no ferrosos	-	-	-	-	0	700
Plásticos rígidos	-	-	-	-	0	700
Plásticos laminados	-	-	-	-	0	700
Materiales orgánicos	-	-	-	-	0	700
Textiles	-	-	-	-	0	700
Residuos verdes	0	101	-	-	0	700
Otros	-	-	-	-	0	700
Escorias y cenizas	-	-	-	-	105.563	700
Compost	-	-	0	326	0	700
Total	0	101	0	326	105.563	700

REFERENCIAS

- (a) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (b) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (c) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1. En este caso coincide con la Fracción Seca (1) por la forma en que son transportados.
- (d) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (e) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (f) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (g) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (h) CEMPRE

ENERGÍA Y COMBUSTIBLES

Matriz de generación de energía eléctrica (a)	
	%
Generación hidráulica	51,0
Generación eólica	24,0
Generación térmica fuel-oil	1,0
Generación térmica gas oil	
Generación térmica gas natural	6,0
Generación térmica biomasa	18,0
Total	100

Factores emisión por uso de combustibles fósiles (b)				
		Gas natural	Gas oil	Fuel oil
		g/m ³	g/L	g/L
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	2189,5	3489,8	3385,5
	CH ₄	6,09	0,52	0,56
	N ₂ O	1,92E-04	1,35E-02	1,35E-02
	SO _x	31,57	24,77	23,25
	NO _x	8,17	7,24	5,30
	HCl	1,57E-03	3,00E-03	8,47E-02
	NH ₃	4,82E-02	4,79E-03	2,13E-01
	Dioxinas y furanos	1,76E-12	3,00E-12	3,15E-10
Emisiones al agua	Hg	1,20E-06	1,59E-04	1,05E-05
	DQO	0,69	0,10	0,11
	N total	7,34E-04	1,30E-03	1,40E-03
	P total	5,75E-05	6,00E-03	1,49E-04
	Dioxinas y furanos			
	Hg	1,76E-07	1,17E-08	1,32E-08

Factores emisión para la generación eléctrica (c)					
		Térmica fuel oil	Térmica gas oil	Térmica gas natural	Biomasa
		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Emisiones al aire	CO ₂ fósil	898,5	1236,6	665,3	0,0
	CH ₄	0,15	0,18	1,85	0,00
	N ₂ O				0,00E+00
	SO _x	6,18	8,78	9,58	0,03
	NO _x	1,41	2,56	2,48	0,65
	HCl	2,25E-02	1,06E-03	4,79E-01	0,00E+00
	NH ₃	5,64E-02	1,70E+00	1,47E-02	
	Dioxinas y furanos				0,00E+00
Emisiones al agua	Hg				0,00E+00
	DQO	0,03	0,04	0,21	0,00
	N total	3,72E-04	4,62E-04	2,23E-04	
	P total	3,95E-05	2,13E-03	1,74E-05	
	Dioxinas y furanos				0,00
	Hg	3,50E-09	4,16E-09	5,35E-08	0,00E+00

Energía térmica de combustibles (d)	
Gas oil	0,0387 GJ/L
Fuel oil	0,0417 GJ/L
Gas natural	0,0381 GJ/m ³
Biomasa	0,0241 GJ/kg

COMENTARIOS

- Se considera que las emisiones asociadas a la energía desplazada en las distintas operaciones unitarias se reparten de acuerdo a la matriz de generación.
- Los factores de emisión por uso de combustible incluyen la producción y consumo.

REFERENCIAS

- (a) Promedio 2008/2012. DNE: <http://www.dne.gub.uy/-/series-estadisticas-de-energia-electrica->
- (b) EPA-RTI. Energy model, Appendix C Table 1 (1999)
- (c) EPA-RTI. Energy model, Appendix B Table 1 (1999)
- (d) EPA-RTI. Energy model, Table 3-7 (1999)

RECOLECCION Y TRANSPORTE

Consumos específicos de combustible (a)	
Camión abierto en ciudad	40 L/100km
Camión abierto en media distancia	30 L/100km
Camión compactador	0,15 L/(km.ton)

Capacidad de carga del camión (b)	
Camión abierto	20 m3
Camión compactador	10 ton

Transporte de la fracción seca separada en origen hacia plantas de clasificación (1)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	101.080 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	10 km
Consumo de combustible	215.923 L/año

Transporte de la fracción mixta hacia planta de incineración o SDF (2)	
Tipo de vehículo	Camión compactador
Cantidad de residuos transportados	598.920 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	25 km
Consumo de combustible	2.245.950 L/año

Transporte de la fracción húmeda hacia planta de tratamiento biológico (3)	
Tipo de vehículo	Camión compactador
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	25 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de residuos verdes hacia planta de tratamiento biológico (4)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	30 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de descartes hacia planta de incineración (5)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	7.238 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	15 km
Consumo de combustible	18.102 L/año

Transporte de materiales clasificados hacia plantas de reciclaje (6)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	93.842 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	50 km
Consumo de combustible	446.013 L/año

Transporte de compost hacia sitios de aplicación (7)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	50 km
Consumo de combustible	0 L/año

Consumo de combustible	
Consumo total de combustible	2.925.988 L/año
Consumo específico de combustible	4,18 L/ton

Balance de energía	
Consumo neto de combustibles	113.106 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	n/c GJ/año
Consumo neto de energía	113.106 GJ/año

Emisiones		
		ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	10.211
	CH4	1,52
	N2O	0,0395
	SOx	72,49
	NOx	21,20
	HCl	0,01
	NH3	0,01
	Dioxinas y furanos	8,76E-12
	Hg	4,65E-04
	DQO	0,30
Emisiones al agua	N total	3,82E-03
	Ptotal	1,76E-02
	Dioxinas y furanos	0,00E+00
	Hg	3,44E-08

COMENTARIOS

- Se considera que cada una de las fracciones son recolectadas mediante el mismo sistema en todos los circuitos, lo cual no es necesariamente cierto si se consideran circuitos suburbanos y rurales, y otras situaciones particulares.

- Se considera que el transporte de la fracción mixta es el mismo si esta es dirigida a la planta de incineración como al sitio de disposición final (Transporte 2), por lo que no se diferencian.

- En el consumo total de combustible está incluido el transporte de todas las corrientes (descartes, materiales clasificados, compost, etc.) y no solo de los residuos generados.

- El consumo específico de combustible está basado en la cantidad de residuos generados.

REFERENCIAS

(a) McDougall-White, p. 419 (consumos para camión abierto).

(b)

INCINERACIÓN

Ingreso de residuos	
	ton/año
Papel y cartón	59.290
Vidrio	16.072
Metales ferrosos	7.700
Metales no ferrosos	1.400
Plásticos rígidos	19.516
Plásticos laminados	40.180
Materiales orgánicos	352.800
Textiles	10.500
Residuos verdes	30.100
Otros	68.600
Total	606.158

Eficiencia en la generación de energía (a)	
Eficiencia de conversión de la energía	28 %
Consumo de energía en la planta de incineración	15 %
Consumo de gas natural como combustible auxiliar	0,23 m3/ton

Factores de emisión por combustión de materiales (b)									
	Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles	Orgánicos	Otros
	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
CO2 fósil		15,422	43,546	43,999	2,643,581	2,745,187	1,280,000		1,280,000
CH4	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36		1,36	
N2O									
SOx	381,02	6,08	14,15	14,29	1,156,36	1,112,77	118,00	162,48	118,00
NOx	89,298	14,28	33,12	33,46	2,710,21	2,608,04	948,00	380,77	948,00
HCl	181,08	2,89	6,72	6,79	549,57	528,85	75,00	77,21	75,00
NH3									
Dioxinas y furanos	2,25E-05	1,02E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,69E-04	3,50E-04	2,33E-05	1,08E-05	2,33E-05
Hg	1,72E-02	6,62E-03	1,92E-02	2,62E-02	6,62E-03	2,36E-01	5,55E-02	9,93E-03	5,55E-02
DQO									
N total									
P total									
Dioxinas y furanos									
Hg									
Residuos sólidos	84,000	900,000	850,000	900,000	900,000	60,000	77,000	75,000	420,000

Factores de emisión en la fabricación de insumos (c)			
	Cal	Amoniaco	Carbón activado
	g/ton	g/ton	g/ton
CO2 fósil	3,322		
CH4	856,09		
N2O			
SOx	0,00		
NOx	0,00		
HCl	1,169,14		
NH3	0,18		
Dioxinas y furanos			
Hg	3,90E-03		
DQO	14,37		
N total	4,13E-02		
P total	5,72E-01		
Dioxinas y furanos			
Hg	3,57E-06		
Energía (kWh/ton)	1489,17		
Factor de utilización (ton/ton)	0,0071	0,0015	

Poder calorífico inferior (d)	
	MI/ton
Papel y cartón	16,300
Vidrio	200
Metales ferrosos	700
Metales no ferrosos	700
Plásticos rígidos	32,600
Plásticos laminados	32,600
Materiales orgánicos	4,700
Textiles	17,500
Residuos verdes	18,700
Otros	13,778
Total	10,347

Generación de energía	
Energía contenida en los residuos	6,272,037 GJ/año
Generación total de energía eléctrica	487,825 MWh/año
Potencia total de generación	55,7 MW
Consumo de energía eléctrica en planta	73,174 MWh/año
Potencia consumida en planta	8,4 MW
Generación neta de energía eléctrica de exportación	414,651 MWh/año
Potencia neta de generación	47,3 MW

Consumo de insumos	
Consumo de cal	4,304 ton/año
Consumo de amoníaco	909 ton/año
Consumo de carbón activado	0 ton/año

Recuperación de metales ferrosos	
Tasa de recuperación de metales ferrosos	0 %
Metales ferrosos recuperados	0 ton/año

Consumo de combustible auxiliar	
Requerimiento de gas natural como combustible auxiliar	139,416 m3/año
Utilización de biogas como combustible auxiliar	100 %
Consumo de biogas del tratamiento biológico	0 m3/año
Consumo de gas natural de la red	139,416 m3/año

Generación de lodos y cenizas	
Generación de lodos y cenizas	105,563 ton/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	5,308 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	-1,469,672 GJ/año
Consumo neto de energía	-1,464,365 GJ/año

Emisiones					
	Incineración	Energía	Combustible auxiliar	Insumos	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
CO2 fósil	263,787	-20,277	305	14	243,829
CH4	0,72	-46,57	0,85	3,68	-41,32
N2O	0,00E+00	0,00E+00	2,68E-05	0,00E+00	2,68E-05
SOx	161,64	-266,64	4,40	0,00	-100,60
NOx	431,79	-115,77	1,14	0,00	317,16
HCl	78,32	-12,02	0,00	5,03	71,33
NH3	0,00	-0,60	0,01	0,00	-0,59
Dioxinas y furanos	2,47E-05	0,00E+00	2,46E-13	0,00E+00	2,47E-05
Hg	1,91E-02	0,00E+00	1,68E-07	1,68E-05	1,91E-02
DQO	0,00	-5,32	0,10	0,06	-5,16
N total	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01
P total	0,00	0,00	0,00	2,46E-03	0,00
Dioxinas y furanos	0	0	0	0	0
Hg	0,00E+00	-1,35E-06	2,46E-08	1,54E-08	-1,31E-06

COMENTARIOS

- Toda la energía recuperada es utilizada para la generación de energía eléctrica, parte de la cual es utilizada en el proceso y el resto se exporta a la red.
- El gas natural utilizado como combustible auxiliar se considera 100 % CH4.
- La generación de cenizas y lodos de tratamiento incluye las cenizas de fondo y cenizas volátiles.

REFERENCIAS

- Eficiencia de conversión y consumos de energía en planta: Themelis-Díaz, 2012; consumo de gas natural: McDougall.
- RTI Input_Document_OCR Table 7.6. Los factores para Textiles y Otros, y todos los valores para dioxinas y furanos y residuos sólidos de McDougall: White Tabla 20.4.
- RTI Input_Document_OCR Table 7.6.
- Themelis-Díaz, 2012.

PLANTA DE CLASIFICACIÓN

Flujo de residuos	
	ton/año
Ingreso total de residuos	101.080
Descarte total de residuos	7.238

Consumo de energía eléctrica y combustible (a)	
Consumo de energía eléctrica	8 kWh/ton
Consumo de gas oil	0,1 L/ton

Consumo de energía eléctrica y combustible	
Consumo de energía eléctrica	809 MWh/año
Consumo de gas oil	10.108 L/año

Balance de energía	
Consumo neto de combustibles	391 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	2.911 GJ/año
Consumo neto de energía	3.302 GJ/año

Emisiones		
		ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	75
	CH4	0,10
	N2O	0,0001
	SOx	0,77
	NOx	0,30
	HCl	0,02
	NH3	0,00
	Dioxinas y furanos	3,03E-14
Emisiones al agua	Hg	1,61E-06
	DQO	0,01
	N total	2,70E-05
	P total	6,18E-05
	Dioxinas y furanos	0,00E+00
	Hg	2,74E-09

COMENTARIOS

REFERENCIAS

(a) Mc.Dougall-White (2004). RTI Input_Document_CCR Table 4.5.

RECICLAJE DE MATERIALES

Ingreso de residuos	
	ton/año
Papel y cartón	48.510
Vidrio	3.528
Metales ferrosos	23.100
Metales no ferrosos	5.600
Plásticos rígidos	4.284
Plásticos laminados	8.820
Textiles	0
Total	93.842

	Consumo de energía eléctrica (a)		Consumo de gas oil (b)		Consumo de gas natural (c)		Consumo de fuel oil (d)	
	Material virgen	Reciclaje	Material virgen	Reciclaje	Material virgen	Reciclaje	Material virgen	Reciclaje
	kWh/ton	kWh/ton	L/ton	L/ton	m3/ton	m3/ton	L/ton	L/ton
Papel y cartón	3.110	1.216	25	4	359	241	26	8
Vidrio	64	22	17	9	145	101	13	1
Metales ferrosos			57	18	405	128	714	229
Metales no ferrosos	20.592	907	98	33	758	119	477	5
Plásticos rígidos	433	689		9	339	26	315	9
Plásticos laminados	479	689		9	401	26	304	9
Textiles								

		Factores de emisión en proceso de reciclaje (e)						
		Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles
		g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
Emisiones al aire	CO2 fósil			539.784	82.555	157.399	157.399	
	CH4			1.170,29				
	N2O							
	SOx	0,01	453,60	2.707,99	13,61	852,77	852,77	
	NOx	0,59		1.601,21	14.560,56	1.642,03	1.642,03	
	HCl			81,19	158,76	0,14	0,14	
	NH3							
	Dioxinas y furanos							
Hg	0,01							
Emisiones al agua	DQO	4.944			68	274	274	
	N total			0,73	308,45	0,06	0,06	
	P total			1,12	0,83	0,00635	0,00635	
	Dioxinas y furanos							
	Hg	1.45E-05			2.49E-05	3.59E-06	3.59E-06	

Factores de emisión en fabricación del material virgen (f)								
		Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles
		g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
Emisiones al aire	CO2 fósil	0	161.482	1.651.104	1.705.536	1.964.088	2.004.912	
	CH4			2.095,63	557,93			
	N2O				2,00			
	SOx	599	454	4,627	17.917	21.591	6.895	
	NOx	304		2.504	14.833	17.781	10.251	
	HCl			61,7	49,9	99,8	63,5	
	NH3				9,53			
	Dioxinas y furanos							
	Hg	9,07E-03			7,26E-02			
Emisiones al agua	DQO	712			490	2.994	1.361	
	N total			43,39	2,95	-0,0121	3,51	
	P total			0,186	4,00E-03	2,962	1,48	
	Dioxinas y furanos							
	Hg	2,49E-05			2,68E-03			

Eficiencia de reciclaje (z)	
%	
Papel y cartón	94,3
Vidrio	97,1
Metales ferrosos	84,0
Metales no ferrosos	93,5
Plásticos rígidos	86,2
Plásticos laminados	86,2
Textiles	

Consumo de energía y combustibles	
Consumo neto de energía eléctrica	-187.315 MWh/año
Consumo neto de gas oil	-1.976.604 L/año
Consumo neto de gas natural	-18.283.609 m3/año
Consumo neto de fuel oil	-16.139.663 L/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	-1.445.824 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	-674.333 GJ/año
Consumo neto de energía	-2.120.159 GJ/año

		Emisiones				
		Reciclaje	Material virgen	Energía	Combustibles	Total
		ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	12,684	-64,017	-9,160	-101,571	-162,065
	CH4	22,71	-43,58	-21,04	-121,35	-163,26
	N2O	0,00E+00	-1,05E-02	0,00E+00	-2,48E-01	-0,259
	SOx	63,80	-344,69	-120,45	-1001,42	-1402,76
	NOx	125,88	-283,75	-52,30	-249,21	-459,38
	HCl	7,41	-7,31	-5,43	-1,40	-6,73
	NH3	0,00E+00	-4,99E-02	-2,70E-01	-4,33E+00	-4,65
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-5,12E-09	-5,12E-09
	Hg	2,49E-04	-7,95E-04	0,00E+00	-5,05E-04	-1,05E-03
Emisiones al agua	DQO	230	-57	-2	-15	156
	N total	1,630	-0,884	-0,003	-0,039	0,704
	P total	2,62E-02	-2,58E-02	-2,70E-04	-1,53E-02	-0,015
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Hg	8,35E-07	-1,52E-05	-6,08E-07	-3,46E-06	-1,84E-05

COMENTARIOS

- Los valores de consumo de energía, gas-oil, gas natural, y de emisiones, tanto para el proceso de reciclaje como de fabricación de materiales vírgenes se basan en ton de los materiales finalmente producidos.
- Las emisiones no incluyen aquellas derivadas del consumo de energía y combustibles. Solo corresponden a las emisiones del proceso.
- La eficiencia de reciclaje se refiere a la cantidad de materiales reciclados obtenidos a partir de los residuos recuperados.

REFERENCIAS

- (a) RTI LCI_Report_OCR. (Papel 1º: 5.3-1; Papel 2º: 5.3-2; Vidrio 1º: 4-1; Vidrio 2º: 4-2; Metal Fe 1º: 7-2; Metal Fe 2º: 7-7; Metales no Fe 1º: 3-1; Metales no Fe 2º: 3-2; Plásticos Laminados 1º: 6-6; Plásticos Rígidos 1º: 6-10; Plásticos 2º: 6-13)
- (b) RTI LCI_Report_OCR.
- (c) RTI LCI_Report_OCR.
- (d) RTI LCI_Report_OCR. El consumo de carbón que indica la referencia está incorporado en el fuel oil como consumo equivalente de acuerdo al poder calorífico.
- (e) RTI LCI_Report_OCR.
- (f) RTI LCI_Report_OCR. El valor de CO2fósil para Papel 1º en realidad corresponde al secuestro de CO2 atmosférico en el crecimiento de los árboles utilizados en la fabricación del papel y no a emisiones propiamente.
- (g) RTI LCI_Report_OCR.

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Ingreso de residuos	
	ton/año
Fracción húmeda	0
Residuos Verdes	0
Total	0

Generación de biogás y biometano (a)	
Producción de biogás	126 m3/ton
Contenido de metano en el biogás	55 %

Consumo de energía (c)	
Consumo de energía eléctrica en el tratamiento	93 kWh/ton
Consumo de energía en la producción de fertilizantes	50,7 kWh/ton
Consumo de gas natural en la producción de fertilizantes	946 m3/ton

Factores de emisión (d)			
	Tratamiento biológico	Generación eléctrica	Fabricación fertilizantes
	g/ton	g/m3	g/ton
CO2 fósil			531.000
CH4			215
N2O			3.100
SOx		2,20E-02	
NOx		1,17	140
HCl		1,50E-02	
NH3	498,96		405
Dioxinas y furanos		3,30E-09	
Hg			
DQO	25		
N total	2,10		
P total	2,10		
Dioxinas y furanos			
Hg			

Generación de biogás	
Producción de biogás	0 m3/año
Utilización de biogás como combustible auxiliar en incineración	0,0 %
Consumo de biogás como combustible auxiliar en incineración	0 m3/año
Utilización de biogás para generación eléctrica	100,0 %
Desvío de biogás para generación eléctrica	0 m3/año
PCI Biogás	0,0209 GJ/m3
Eficiencia de generación de energía eléctrica	30 %
Generación de energía eléctrica	0 MWh/año

Generación de energía eléctrica	
Eficiencia de generación de energía eléctrica	30 %
Generación de energía eléctrica	0 MWh/año
Consumo de energía eléctrica en planta	0 MWh/año
Generación neta de energía eléctrica de exportación	0 MWh/año

Emisiones					
	Tratamiento	Energía	Gas natural desplazado	Fertilizantes	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
CO2 fósil	0	0	0	0	0
CH4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N2O	0	0	0	0	0
SOx	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOx	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
HCl	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
NH3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Hg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
DQO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N total	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00
Emisiones al agua P total	0,00	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0,00
Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Hg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Producción de compost (b)	
Producción de compost	42 %
Contenido de nitrógeno en el compost	1,1 %

Producción de compost	
Producción de compost	0 ton/año
Utilización de compost como bioabono	100 %
Generación de bioabono	0 ton/año
Equivalente de nitrógeno fertilizante	0 ton/año
Energía desplazada por sustitución de fertilizantes	0 MWh/año
Ahorro de gas natural por sustitución de fertilizantes	0 m3/año
Desvío de compost hacia sitio de disposición final	0 %
Desvío de compost hacia sitio de disposición final	0 ton/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	0 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	0 GJ/año
Consumo neto de energía	0 GJ/año

COMENTARIOS

REFERENCIAS

- (a) OWS-DRANCO Technology.
- (b) OWS-DRANCO Technology.
- (c) Tratamiento biológico: DRANCO System. Fertilizantes: Base de datos NREL.
- (d) Tratamiento biológico: RTI/EPA Compost Model OCR, Table 9. Generación eléctrica: McDougall, Tabla 21.6, B. Fertilizantes: Base de datos NREL.

DISPOSICIÓN FINAL

Ingreso de residuos	
	ton/año
Cenizas y lodos	105.563
Compost	0
Fracción mixta	0
Total	105.563

Generación de biogás (a)		
Generación de biogás por compost		0 m³/ton
Generación de biogás por fracción orgánica		250 m³/ton
Contenido de metano en el biogás		55 %

Consumo de energía y combustible (b)	
Consumo de energía eléctrica	0,15 kWh/m³
Consumo de gas-oil	0,6 L/m³

Factores de emisión (c)						
	Compost	Cenizas	Fracción mixta	Fugas	Quema en antorcha	Generación eléctrica
	g/ton	g/ton	g/ton	g/m³	g/m³	g/m³
Emisiones al aire						
CO2 fósil				393		
CH4						
N2O						
SOx					0,05	2,20E-02
NOx					0,2	1,17
HCl					0,03	1,50E-02
NH3						
Dioxinas y furanos					1,80E-10	3,30E-09
Hg					5,00E-05	
Emisiones al agua						
DQO	6	2,4	6			
N total	0,5	0,0005	0,5			
P total	0,5		0,5			
Dioxinas y furanos	3,00E-09	3,00E-10	3,00E-09			
Hg	5,00E-04	1,00E-04	5,00E-04			

Volumen ocupado en sitio de disposición final	
	m³/año
Total	150.805

Generación de biogás	
Producción de biogás	0 m³/año
Tasa de recolección de biogás	0 %
Fugas de biogás a la atmósfera	0 m³/año
Quema de biogás en antorcha	0 %
Quema de biogás en antorcha	0 m³/año
Utilización de biogás para generación eléctrica	100 %
Desvío de biogás para generación eléctrica	0 m³/año
PCI Biogás	0,0209 GJ/m³
Eficiencia de generación de energía eléctrica	30 %
Generación de energía eléctrica	0 MWh/año

Consumo de energía y combustible	
Consumo de energía eléctrica en planta	23 MWh/año
Generación neta de energía eléctrica de exportación	0 MWh/año
Consumo de energía eléctrica de la red	23 MWh/año
Consumo de gas oil	90.483 L/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	3.498 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	81 GJ/año
Consumo neto de energía	3.579 GJ/año

Emisiones					
	SDF	Energía	Combustibles	Antorcha	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emisiones al aire					
CO2 fósil	0	1	316	0	317
CH4	0	0	0	0,00	0,05
N2O	0	0	0	0	0
SOx	0	0	2	0,00	2,26
NOx	0	0	1	0,00	0,66
HCl	0	0	0	0,000	0,001
NH3	0	0	0	0,00	0,00
Dioxinas y furanos	0	0	0	0,00E+00	2,71E-13
Hg	0	0	0	0,00E+00	1,44E-05
Emisiones al agua					
DQO	0,25	0,00	0,01	-	0,26
N total	5,28E-05	3,87E-07	1,18E-04	-	1,71E-04
P total	0,00E+00	3,26E-08	5,43E-04	-	5,43E-04
Dioxinas y furanos	3,17E-11	0,00E+00	0,00E+00	-	3,17E-11
Hg	1,06E-05	7,34E-11	1,06E-09	-	1,06E-05

COMENTARIOS

- El consumo de energía eléctrica incluye el tratamiento de lixiviados.
- En las emisiones en el sitio de disposición final están incluidas las fugas de biogás.

REFERENCIAS

- Generación de biogás: McDougall-White. p. 504-505. Contenido de metano: McDougall-White. p. 507.
- McDougall-White. p. 501.
- McDougall-White. Para emisiones líquidas se asume una generación de 150 L de lixiviados por ton de MSW (p. 511) y una composición según Tabla 21.7. Para emisiones al aire Tabla 21.5 y 21.6. Quema antorcha: McDougall, Tabla 21.5 Alemania.

RESULTADOS

Emisiones							
	Recolección y transporte	Incineración	Plantas de clasificación	Reciclaje de materiales	Tratamiento biológico	Disposición final	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	10.211	243.829	75	-162.065	0	317
	CH4	1,52	-41,32	0,10	-163,26	0,00	0,05
	N2O	0,0395	0,0000	0,0001	-0,2586	0,0000	0,0012
	SOx	72,49	-100,60	0,77	-1.402,76	0,00	2,26
	NOx	21,20	317,16	0,30	-459,38	0,00	0,66
	HCl	0,01	71,33	0,02	-6,73	0,00	0,00
	NH3	0,01	-0,59	0,00	-4,65	0,00	0,00
	Dioxinas y furanos	8,76E-12	2,47E-05	3,03E-14	-5,12E-09	0,00E+00	2,71E-13
	Hg	4,65E-04	1,91E-02	1,61E-06	-1,05E-03	0,00E+00	1,44E-05
Emisiones al agua	DQO	0,30	-5,16	0,01	156,10	0,00	0,26
	N total	3,82E-03	-6,81E-03	2,70E-05	7,04E-01	0,00E+00	1,71E-04
	P total	1,76E-02	1,87E-03	6,18E-05	-1,53E-02	0,00E+00	5,43E-04
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,17E-11
	Hg	3,44E-08	-1,31E-06	2,74E-09	-1,84E-05	0,00E+00	1,06E-05

Indicadores							
	Recolección y transporte	Incineración	Plantas de clasificación	Reciclaje de materiales	Tratamiento biológico	Disposición final	Total
Volumen ocupado en SDF (m3/año)	-	-	-	-	-	-	150.805
Tasa global de recuperación de materiales (%)	-	-	-	-	-	-	12,2
Consumo de combustibles en transporte (tep/año)	-	-	-	-	-	-	2.703
Consumo de combustibles (tep/año)	2.703	127	9	-34.555	0	84	-31.632
Consumo de energía eléctrica (MWh/año)	-	-408.242	809	-187.315	0	23	-594.726
Consumo neto de energía (GJ/año)	113.106	-1.464.365	3.302	-2.120.159	0	3.579	-3.464.537
Emisión de dioxinas y furanos (kgPCDD-PCDF/año)	8,76E-09	0,024689973	3,02735E-11	-5,12213E-06	0	3,19E-08	2,47E-02
Emisión de mercurio (kgHg/año)	0,46	19,13	0,00	-1,07	0,00	0,02	18,55

Categorías de impacto							
	Recolección y transporte	Incineración	Plantas de clasificación	Reciclaje de materiales	Tratamiento biológico	Disposición final	Total
Calentamiento global (tonCO2eq/año)	10.255	242.061	77	-165.573	0	318	88.038
Acidificación (tonSO2eq/año)	87,4	183,1	1,0	-1.739,0	0,0	2,7	-1.464,8
Eutrofización (tonPO4/año)	2,8	40,9	0,0	-57,7	0,0	0,1	-13,8

Poder de Calentamiento Global (a)	
(kgCO2eq/kg)	
CO2	1
CH4	21
N2O	310

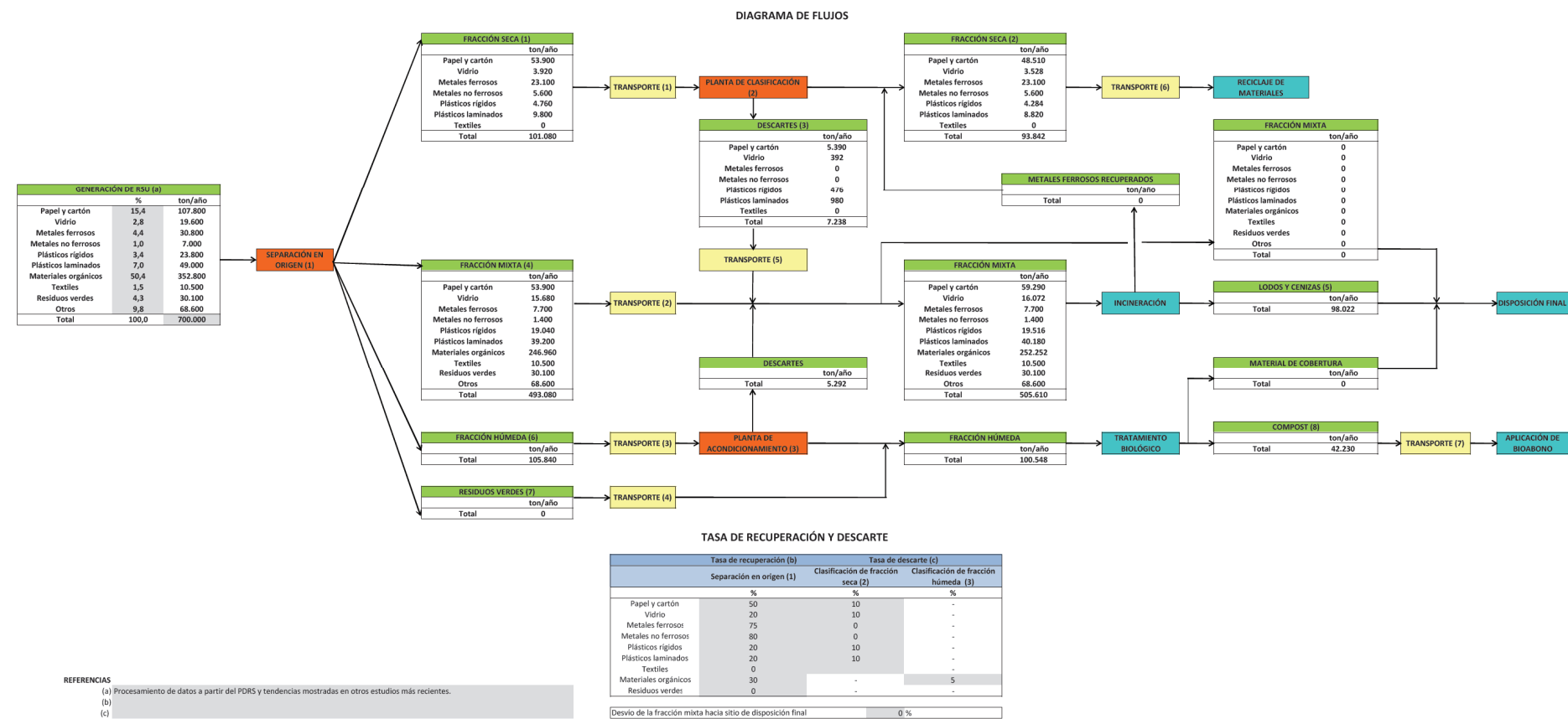
Poder de acidificación (b)	
(kgSO2eq/kg)	
SO2	1
NOx	0,7
HCl	0,88
NH3	1,88

Poder de acidificación (b)		
(kgSO2eq/kg)		
Emisiones al aire	NH3	0,35
	NOx	0,13
Emisiones al agua	N	0,42
	P	3,06
	DQO	0,022

REFERENCIAS

- (a) Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC)
 (b) Guinée, 2004, Table 4.3.10.2 - Heijungs (Backgrounds)
 (c) Guinée, 2004, Table 4.3.11.1 - Heijungs et al (Backgrounds)

III.4 S3_EP



PESOS ESPECÍFICOS

	FRACCIÓN SECA (1)		FRACCIÓN SECA (2)		DESCARTES (3)	
	Materiales sueltos (a)		Materiales compactados (b)		Materiales sueltos (c)	
	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3
Papel y cartón	53.900	89	48.510	131	5.390	89
Vidrio	3.920	196	3.528	481	392	196
Metales ferrosos	23.100	89	23.100	160	0	89
Metales no ferrosos	5.600	160	5.600	240	0	160
Plásticos rígidos	4.760	65	4.284	131	476	65
Plásticos laminados	9.800	65	8.820	131	980	65
Materiales orgánicos	-	-	-	-	-	-
Textiles	0	65	0	101	0	65
Resíduos verdes	-	-	-	-	-	-
Otros	-	-	-	-	-	-
Escorias y cenizas	-	-	-	-	-	-
Compost	-	-	-	-	-	-
Total	101.080	94	93.842	158	7.238	90

	FRACCIÓN MIXTA (4)		ESCORIA, CENIZAS Y LODOS (5)		FRACCIÓN HÚMEDA (6)	
	Materiales compactados (d)		(e)		Materiales compactados (f)	
	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3
Papel y cartón	53.900	451	-	-	-	-
Vidrio	15.680	451	-	-	-	-
Metales ferrosos	7.700	451	-	-	-	-
Metales no ferrosos	1.400	451	-	-	-	-
Plásticos rígidos	19.040	451	-	-	-	-
Plásticos laminados	39.200	451	-	-	-	-
Materiales orgánicos	246.960	451	-	-	105.840	451
Textiles	10.500	451	-	-	-	-
Resíduos verdes	30.100	451	-	-	-	-
Otros	68.600	451	-	-	-	-
Escorias y cenizas	-	-	98.022	950	-	-
Compost	-	-	-	-	-	-
Total	493.080	451	98.022	950	105.840	451

	RESIDUOS VERDES (7)		COMPOST (8)		RESIDUOS EN DISPOSICIÓN FINAL	
	Materiales sueltos (g)		Materiales a granel (g)		Materiales compactados (h)	
	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3	ton/año	kg/m3
Papel y cartón	-	-	-	-	0	700
Vidrio	-	-	-	-	0	700
Metales ferrosos	-	-	-	-	0	700
Metales no ferrosos	-	-	-	-	0	700
Plásticos rígidos	-	-	-	-	0	700
Plásticos laminados	-	-	-	-	0	700
Materiales orgánicos	-	-	-	-	0	700
Textiles	-	-	-	-	0	700
Resíduos verdes	0	101	-	-	0	700
Otros	-	-	-	-	0	700
Escorias y cenizas	-	-	-	-	98.022	700
Compost	-	-	42.230	326	0	700
Total	0	101	42.230	326	98.022	700

REFERENCIAS

- (a) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (b) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (c) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1. En este caso coincide con la Fracción Seca (1) por la forma en que son transportados.
- (d) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (e) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (f) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (g) Tchobanoglous (1994). Tabla 4.1
- (h) CEMPRE

ENERGÍA Y COMBUSTIBLES

Matriz de generación de energía eléctrica (a)	
	%
Generación hidráulica	51,0
Generación eólica	24,0
Generación térmica fuel-oil	1,0
Generación térmica gas oil	
Generación térmica gas natural	6,0
Generación térmica biomasa	18,0
Total	100

Factores emisión por uso de combustibles fósiles (b)				
		Gas natural	Gas oil	Fuel oil
		g/m3	g/L	g/L
Emisiones al aire	CO2 fósil	2189,5	3489,8	3385,5
	CH4	6,09	0,52	0,56
	N2O	1,92E-04	1,35E-02	1,35E-02
	SOx	31,57	24,77	23,25
	NOx	8,17	7,24	5,30
	HCl	1,57E-03	3,00E-03	8,47E-02
	NH3	4,82E-02	4,79E-03	2,13E-01
	Dioxinas y furanos	1,76E-12	3,00E-12	3,15E-10
	Hg	1,20E-06	1,59E-04	1,05E-05
Emisiones al agua	DQO	0,69	0,10	0,11
	N total	7,34E-04	1,30E-03	1,40E-03
	P total	5,75E-05	6,00E-03	1,49E-04
	Dioxinas y furanos			
	Hg	1,76E-07	1,17E-08	1,32E-08

Factores emisión para la generación eléctrica (c)					
		Térmica fuel oil	Térmica gas oil	Térmica gas natural	Biomasa
		g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Emisiones al aire	CO2 fósil	898,5	1236,6	665,3	0,0
	CH4	0,15	0,18	1,85	0,00
	N2O				0,00E+00
	SOx	6,18	8,78	9,58	0,03
	NOx	1,41	2,56	2,48	0,65
	HCl	2,25E-02	1,06E-03	4,79E-01	0,00E+00
	NH3	5,64E-02	1,70E+00	1,47E-02	
	Dioxinas y furanos				0,00E+00
	Hg				0,00E+00
Emisiones al agua	DQO	0,03	0,04	0,21	0,00
	N total	3,72E-04	4,62E-04	2,23E-04	
	P total	3,95E-05	2,13E-03	1,74E-05	
	Dioxinas y furanos				0,00
	Hg	3,50E-09	4,16E-09	5,35E-08	0,00E+00

Energía térmica de combustibles (d)	
Gas oil	0,0387 GJ/L
Fuel oil	0,0417 GJ/L
Gas natural	0,0381 GJ/m3
Biomasa	0,0241 GJ/kg

COMENTARIOS

- Se considera que las emisiones asociadas a la energía desplazada en las distintas operaciones unitarias se reparten de acuerdo a la matriz de generación.
- Los factores de emisión por uso de combustible incluyen la producción y consumo.

REFERENCIAS

- (a) Promedio 2008/2012. DNE: <http://www.dne.gub.uy/-/series-estadisticas-de-energia-electrica->
- (b) EPA-RTI. Energy model, Appendix C Table 1 (1999)
- (c) EPA-RTI. Energy model, Appendix B Table 1 (1999)
- (d) EPA-RTI. Energy model, Table 3-7 (1999)

RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE

Consumos específicos de combustible (a)	
Camión abierto en ciudad	40 L/100km
Camión abierto en media distancia	30 L/100km
Camión compactador	0,15 L/(km.ton)

Capacidad de carga del camión (b)	
Camión abierto	20 m3
Camión compactador	10 ton

Transporte de la fracción seca separada en origen hacia plantas de clasificación (1)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	101.080 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	10 km
Consumo de combustible	215.923 L/año

Transporte de la fracción mixta hacia planta de incineración o SDF (2)	
Tipo de vehículo	Camión compactador
Cantidad de residuos transportados	493.080 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	25 km
Consumo de combustible	1.849.050 L/año

Transporte de la fracción húmeda hacia planta de tratamiento biológico (3)	
Tipo de vehículo	Camión compactador
Cantidad de residuos transportados	105.840 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	25 km
Consumo de combustible	396.900 L/año

Transporte de residuos verdes hacia planta de tratamiento biológico (4)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	0 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	30 km
Consumo de combustible	0 L/año

Transporte de descartes hacia planta de incineración (5)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	7.238 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	15 km
Consumo de combustible	18.102 L/año

Transporte de materiales clasificados hacia plantas de reciclaje (6)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	93.842 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	50 km
Consumo de combustible	446.013 L/año

Transporte de compost hacia sitios de aplicación (7)	
Tipo de vehículo	Camión abierto
Cantidad de residuos transportados	42.230 ton/año
Distancia media recorrida por circuito	50 km
Consumo de combustible	97.155 L/año

Consumo de combustible	
Consumo total de combustible	3.023.143 L/año
Consumo específico de combustible	4,32 L/ton

Balance de energía	
Consumo neto de combustibles	116.862 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	n/c GJ/año
Consumo neto de energía	116.862 GJ/año

Emisiones		
		ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	10.550
	CH4	1,57
	N2O	0,0409
	SOx	74,90
	NOx	21,90
	HCl	0,01
	NH3	0,01
	Dioxinas y furanos	9,05E-12
	Hg	4,80E-04
	DQO	0,32
Emisiones al agua	N total	3,94E-03
	Ptotal	1,81E-02
	Dioxinas y furanos	0,00E+00
	Hg	3,55E-08

COMENTARIOS

· Se considera que cada una de las fracciones son recolectadas mediante el mismo sistema en todos los circuitos, lo cual no es necesariamente cierto si se consideran circuitos suburbanos y rurales, y otras situaciones particulares.

· Se considera que el transporte de la fracción mixta es el mismo si esta es dirigida a la planta de incineración como al sitio de disposición final (Transporte 2), por lo que no se diferencian.

· En el consumo total de combustible está incluido el transporte de todas las corrientes (descartes, materiales clasificados, compost, etc.) y no solo de los residuos generados.

· El consumo específico de combustible está basado en la cantidad de residuos generados.

REFERENCIAS

(a) McDougall-White, p. 419 (consumos para camión abierto).

(b)

INCINERACIÓN

Ingreso de residuos	
	ton/año
Papel y cartón	59.290
Vidrio	16.072
Metales ferrosos	7.700
Metales no ferrosos	1.400
Plásticos rígidos	19.516
Plásticos laminados	40.180
Materiales orgánicos	252.252
Textiles	10.500
Residuos verdes	30.100
Otros	68.600
Total	505.610

Eficiencia en la generación de energía (a)	
Eficiencia de conversión de la energía	78 %
Consumo de energía en la planta de incineración	15 %
Consumo de gas natural como combustible auxiliar	0,23 m3/ton

Factores de emisión por combustión de materiales (b)									
	Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles	Orgánicos	Otros
	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
CO2 fósil		15,422	43,546	43,999	2,643.581	2,745.187	1,280.000		1,280.000
CH4	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36		1,36	
N2O									
SOx	381,02	6,08	14,15	14,29	1,156,36	1,112,77	118,00	162,48	118,00
NOx	892,98	14,28	33,12	33,46	2,710,21	2,608,04	946,00	380,77	946,00
HCl	181,08	2,89	6,72	6,79	549,57	528,85	75,00	77,21	75,00
NH3									
Dioxinas y furanos	2,25E-05	1,02E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,69E-04	3,50E-04	2,33E-05	1,08E-05	2,33E-05
Hg	1,72E-02	6,62E-03	1,92E-02	2,62E-02	6,62E-03	2,36E-01	5,55E-02	9,93E-03	5,55E-02
DQO									
N total									
P total									
Dioxinas y furanos									
Hg									
Residuos sólidos	84.000	900.000	850.000	900.000	900.000	60.000	77.000	75.000	420.000

Factores de emisión en la fabricación de insumos (c)			
	Cal	Amoníaco	Carbón activado
	g/ton	g/ton	g/ton
CO2 fósil	3,322		
CH4	856,09		
N2O			
SOx	0,00		
NOx	0,00		
HCl	1,169,14		
NH3	0,18		
Dioxinas y furanos			
Hg	3,90E-03		
DQO	14,37		
N total	4,13E-02		
P total	5,72E-01		
Dioxinas y furanos			
Hg	3,57E-06		
Energía (kWh/ton)	1489,17		
Factor de utilización (ton/ton)	0,0071	0,0015	

Poder calorífico inferior (d)		MI/ton
Papel y cartón		16.300
Vidrio		200
Metales ferrosos		700
Metales no ferrosos		700
Plásticos rígidos		32.600
Plásticos laminados		32.600
Materiales orgánicos		4.700
Textiles		17.500
Residuos verdes		18.700
Otros		13.778
Total		11.470

Generación de energía	
Energía contenida en los residuos	5,799,461 GJ/año
Generación total de energía eléctrica	451,069 MWh/año
Potencia total de generación	51,5 MW
Consumo de energía eléctrica en planta	67,660 MWh/año
Potencia consumida en planta	7,7 MW
Generación neta de energía eléctrica de exportación	383,409 MWh/año
Potencia neta de generación	43,8 MW

Consumo de combustible auxiliar	
Requerimiento de gas natural como combustible auxiliar	116.290 m3/año
Utilización de biogas como combustible auxiliar	100 %
Consumo de biogas del tratamiento biológico	211.437 m3/año
Consumo de gas natural de la red	0 m3/año

Consumo de insumos	
Consumo de cal	3.590 ton/año
Consumo de amoníaco	758 ton/año
Consumo de carbón activado	0 ton/año

Recuperación de metales ferrosos	
Tasa de recuperación de metales ferrosos	0 %
Metales ferrosos recuperados	0 ton/año

Generación de lodos y cenizas	
Generación de lodos y cenizas	98.022 ton/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	0 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	-1.361.027 GJ/año
Consumo neto de energía	-1.361.027 GJ/año

Emisiones					
		Combustible			
		Incineración	Energía auxiliar	Insumos	Total
		ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
	CO2 fósil	263.787	-18.750	0	245.049
	CH4	0,58	-43,06	0,00	-39,41
	N2O	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	SOx	145,31	-246,55	0,00	-101,25
	NOx	393,50	-107,04	0,00	286,46
	HCl	70,55	-11,11	0,00	63,64
	NH3	0,00	-0,55	0,00	-0,55
	Dioxinas y furanos	2,36E-05	0,00E+00	0,00E+00	2,36E-05
	Hg	1,81E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,81E-02
	DQO	0,00	-4,92	0,00	-4,87
	N total	0,00	-0,01	0,00	-0,01
	P total	0,00	0,00	0,00	0,00
	Dioxinas y furanos	0	0	0	0
	Hg	0,00E+00	-1,24E-06	0,00E+00	-1,23E-06

COMENTARIOS

- Toda la energía recuperada es utilizada para la generación de energía eléctrica, parte de la cual es utilizada en el proceso y el resto se exporta a la red.
- El gas natural utilizado como combustible auxiliar se considera 100 % CH4.
- La generación de cenizas y lodos de tratamiento incluye las cenizas de fondo y cenizas volátiles.

REFERENCIAS

- Eficiencia de conversión y consumos de energía en planta: Themelis-Díaz, 2012; consumo de gas natural: McDougall.
- RTI Input_Document_OCR Table 7.6. Los factores para Textiles y Otros, y todos los valores para dioxinas y furanos y residuos sólidos de McDougall-White Tabla 20.4.
- RTI Input_Document_OCR Table 7.6.
- Themelis-Díaz, 2012.

PLANTA DE CLASIFICACIÓN

Flujo de residuos	
	ton/año
Ingreso total de residuos	101.080
Descarte total de residuos	7.238

Consumo de energía eléctrica y combustible (a)	
Consumo de energía eléctrica	8 kWh/ton
Consumo de gas oil	0,1 L/ton

Consumo de energía eléctrica y combustible	
Consumo de energía eléctrica	809 MWh/año
Consumo de gas oil	10.106 L/año

Balance de energía	
Consumo neto de combustibles	391 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	2.911 GJ/año
Consumo neto de energía	3.302 GJ/año

Emisiones		
		ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	75
	CH4	0.10
	N2O	0.0001
	SOx	0.77
	NOx	0.30
	HCl	0.02
	NH3	0.00
	Dioxinas y furanos	3,03E-14
	Hg	1,51E-06
Emisiones al agua	DDO	0.01
	N total	2,70E-05
	P total	6,18E-05
	Dioxinas y furanos	0,00E+00
	Hg	2,74E-09

COMENTARIOS

REFERENCIAS

[a] McDougall-White (2004). RTI Input_Document_OCR Table 4.5.

RECICLAJE DE MATERIALES

Ingreso de residuos	
	ton/año
Papel y cartón	48.510
Vidrio	3.528
Metales ferrosos	23.100
Metales no ferrosos	5.600
Plásticos rígidos	4.284
Plásticos laminados	8.820
Textiles	0
Total	93.842

	Consumo de energía eléctrica (a)		Consumo de gas oil (b)		Consumo de gas natural (c)		Consumo de fuel oil (d)	
	Material virgen	Reciclaje	Material virgen	Reciclaje	Material virgen	Reciclaje	Material virgen	Reciclaje
	kWh/ton	kWh/ton	L/ton	L/ton	m3/ton	m3/ton	L/ton	L/ton
Papel y cartón	3.110	1.216	25	4	359	241	26	8
Vidrio	64	22	17	9	145	101	13	1
Metales ferrosos			57	18	405	128	714	229
Metales no ferrosos	20.592	907	98	33	758	119	477	5
Plásticos rígidos	433	689		9	339	26	315	9
Plásticos laminados	479	689		9	401	26	304	9
Textiles								

Factores de emisión en proceso de reciclaje (e)								
		Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles
		g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
Emisiones al aire	CO2 fósil			539,784	82,555	157,399	157,399	
	CH4			1.170,29				
	N2O							
	SOx	0,01	453,60	2,707,99	13,61	852,77	852,77	
	NOx	0,59		1.601,21	14.560,56	1.642,03	1.642,03	
	HCl			81,19	158,76	0,14	0,14	
	NH3							
	Dioxinas y furanos							
Hg	0,01							
Emisiones al agua	DQO	4,944			68	274	274	
	N total			0,73	308,45	0,06	0,06	
	P total			1,12	0,83	0,00635	0,00635	
	Dioxinas y furanos							
	Hg	1,45E-05			2,49E-05	3,59E-06	3,59E-06	

Factores de emisión en fabricación del material virgen (f)								
		Papel	Vidrio	Metales Fe	Metales no Fe	Plásticos rígidos	Plásticos laminados	Textiles
		g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton	g/ton
Emisiones al aire	CO2 fósil	0	161.482	1.651.104	1.705.536	1.964.088	2.004.912	
	CH4			2.095,63	557,93			
	N2O				2,00			
	SOx	599	454	4.627	17.917	21.591	6.895	
	NOx	304		2.504	14.833	17.781	10.251	
	HCl			61,7	49,9	99,8	63,5	
	NH3				9,53			
	Dioxinas y furanos							
Hg	9,07E-03			7,26E-02				
Emisiones al agua	DQO	712			490	2.994	1.361	
	N total			43,39	2,95	-0,0121	3,51	
	P total			0,186	4,00E-03	2,962	1,48	
	Dioxinas y furanos							
	Hg	2,49E-05			2,68E-03			

Eficiencia de reciclaje (g)	
%	
Papel y cartón	94,3
Vidrio	97,1
Metales ferrosos	84,0
Metales no ferrosos	93,5
Plásticos rígidos	86,2
Plásticos laminados	86,2
Textiles	

Consumo de energía y combustibles	
Consumo neto de energía eléctrica	-187.315 MWh/año
Consumo neto de gas oil	-1.976.604 L/año
Consumo neto de gas natural	-18.283.609 m3/año
Consumo neto de fuel oil	-16.139.663 L/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	-1.445.824 Gi/año
Consumo neto de energía eléctrica	-674.335 Gi/año
Consumo neto de energía	-2.120.159 Gi/año

Emisiones						
		Reciclaje	Material virgen	Energía	Combustibles	Total
		ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	12.684	-64.017	-9.160	-101.571	-162.065
	CH4	22,71	-43,58	-21,04	-121,35	-163,26
	N2O	0,00E+00	-1,05E-02	0,00E+00	-2,48E-01	-0,259
	SOx	63,80	-344,69	-120,45	-1001,42	-1402,76
	NOx	125,88	-283,75	-52,30	-249,21	-459,38
	HCl	2,41	-2,31	-5,43	-1,40	-6,73
	NH3	0,00E+00	-4,99E-02	-2,70E-01	-4,33E+00	-4,65
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-5,12E-09	-5,12E-09
	Hg	2,49E-04	-7,95E-04	0,00E+00	-5,05E-04	-1,05E-03
	Emisiones al agua	DQO	230	-57	-2	-15
N total		1,630	-0,884	-0,003	-0,039	0,704
P total		2,62E-02	-2,58E-02	-2,70E-04	-1,53E-02	-0,015
Dioxinas y furanos		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Hg		8,35E-07	-1,52E-05	-6,08E-07	-3,46E-06	-1,84E-05

COMENTARIOS

- Los valores de consumo de energía, gas-oil, gas natural, y de emisiones, tanto para el proceso de reciclaje como de fabricación de materiales vírgenes se basan en ton de los materiales finalmente producidos.
- Las emisiones no incluyen aquellas derivadas del consumo de energía y combustibles. Solo corresponden a las emisiones del proceso.
- La eficiencia de reciclaje se refiere a la cantidad de materiales reciclados obtenidos a partir de los residuos recuperados.

REFERENCIAS

- RTI LCI_Report_OCR. (Papel 1º: 5.3-1; Papel 2º: 5.3-2; Vidrio 1º: 4-1; Vidrio 2º: 4-2; Metal Fe 1º: 7-2; Metal Fe 2º: 7-7; Metales no Fe 1º: 3-1; Metales no Fe 2º: 3-2; Plásticos Laminados 1º: 6-6; Plásticos Rígidos 1º: 6-10; Plásticos 2º: 6-13)
- RTI LCI_Report_OCR.
- RTI LCI_Report_OCR.
- RTI LCI_Report_OCR. El consumo de carbón que indica la referencia está incorporado en el fuel oil como consumo equivalente de acuerdo al poder calorífico.
- RTI LCI_Report_OCR.
- RTI LCI_Report_OCR. El valor de CO2fósil para Papel 1º en realidad corresponde al secuestro de CO2 atmosférico en el crecimiento de los árboles utilizados en la fabricación del papel y no a emisionespropiamente.
- RTI LCI_Report_OCR.

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Ingreso de residuos	
	ton/año
Fracción húmeda	100.548
Residuos Verdes	0
Total	100.548

Generación de biogás y biometano (a)	
Producción de biogás	126 m3/ton
Contenido de metano en el biogás	55 %

Consumo de energía (c)	
Consumo de energía eléctrica en el tratamiento	93 kWh/ton
Consumo de energía en la producción de fertilizantes	50,7 kWh/ton
Consumo de gas natural en la producción de fertilizantes	946 m3/ton

Factores de emisión (d)			
	Tratamiento biológico	Generación eléctrica	Fabricación fertilizantes
	g/ton	g/m3	g/ton
Emisiones al aire	CO2 fósil		531.000
	CH4		215
	N2O		3.100
	SOx	2,20E-02	
	NOx	1,17	140
	HCl	1,50E-02	
	NH3		405
	Dioxinas y furanos	3,30E-09	
	Hg		
	DQO	25	
Emisiones al agua	N total	2,10	
	P total	2,10	
	Dioxinas y furanos		
	Hg		

Generación de biogás	
Producción de biogás	12.669.048 m3/año
Utilización de biogás como combustible auxiliar en incineración	1,7 %
Consumo de biogás como combustible auxiliar en incineración	211.437 m3/año
Utilización de biogás para generación eléctrica	98,3 %
Desvío de biogás para generación eléctrica	12.457.611 m3/año
PCI Biogás	0,0209 GJ/m3
Eficiencia de generación de energía eléctrica	30 %
Generación de energía eléctrica	21.738 MWh/año

Generación de energía eléctrica	
Eficiencia de generación de energía eléctrica	30 %
Generación de energía eléctrica	21.738 MWh/año
Consumo de energía eléctrica en planta	9.351 MWh/año
Generación neta de energía eléctrica de exportación	12.387 MWh/año

Emisiones					
	Tratamiento	Energía	Gas natural desplazado	Fertilizantes	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	0	-607	-247	-1.816
	CH4	0,00	-1,39	-0,10	-4,17
	N2O	0	0	-1	-1
	SOx	0,00	-7,71	0,00	-21,58
	NOx	0,00	11,11	-3,59	7,46
	HCl	0,000	-0,173	0,000	-0,173
	NH3	50,17	-0,02	-0,19	49,94
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	4,11E-08	-7,74E-13	4,11E-08
	Hg	0,00E+00	0,00E+00	-5,29E-07	-5,29E-07
	DQO	2,54	-0,16	-0,30	2,08
Emisiones al agua	N total	0	0	-3,22E-04	0,00E+00
	P total	0,21	0,00	-2,53E-05	0,21
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	Hg	0,00E+00	-4,03E-08	-7,74E-08	-1,18E-07

Producción de compost (b)	
Producción de compost	42 %
Contenido de nitrógeno en el compost	1,1 %

Producción de compost	
Producción de compost	42.230 ton/año
Utilización de compost como bioabono	100 %
Generación de bioabono	42.230 ton/año
Equivalente de nitrógeno fertilizante	465 ton/año
Energía desplazada por sustitución de fertilizantes	24 MWh/año
Ahorro de gas natural por sustitución de fertilizantes	439.447 m3/año
Desvío de compost hacia sitio de disposición final	0 %
Desvío de compost hacia sitio de disposición final	0 ton/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	-16.730 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	-44.680 GJ/año
Consumo neto de energía	-61.409 GJ/año

COMENTARIOS

REFERENCIAS

- (a) OWS-DRANCO Technology.
- (b) OWS-DRANCO Technology.
- (c) Tratamiento biológico: DRANCO System. Fertilizantes: Base de datos NREL
- (d) Tratamiento biológico: RTI/EPA Compost Model OCR, Table 9. Generación eléctrica: McDougall, Tabla 21.6, B. Fertilizantes: Base de datos NREL

DISPOSICIÓN FINAL

Ingreso de residuos	
	ton/año
Cenizas y lodos	98.022
Compost	0
Fracción mixta	0
Total	98.022

Generación de biogás (a)	
Generación de biogás por compost	0 m ³ /ton
Generación de biogás por fracción orgánica	250 m ³ /ton
Contenido de metano en el biogás	55 %

Consumo de energía y combustible (b)	
Consumo de energía eléctrica	0,15 kWh/m ³
Consumo de gas-oil	0,6 L/m ³

Factores de emisión (c)					
	Compost	Cenizas	Fracción mixta	Fugas	Quema en antorcha
	g/ton	g/ton	g/ton	g/m ³	g/m ³
Emissiones al aire					
CO ₂ fósil				393	
CH ₄					
N ₂ O					
SO _x					0,05
NO _x					0,2
HCl					0,03
NH ₃					
Dioxinas y furanos					1,80E-10
Hg					5,00E-05
Emissiones al agua					
DQO	6	2,4	6		
N total	0,5	0,0005	0,5		
P total	0,5		0,5		
Dioxinas y furanos	3,00E-09	3,00E-10	3,00E-09		
Hg	5,00E-04	1,00E-04	5,00E-04		

Volumen ocupado en sitio de disposición final	
	m ³ /año
Total	140.032

Generación de biogás	
Producción de biogás	0 m ³ /año
Tasa de recolección de biogás	0 %
Fugas de biogás a la atmósfera	0 m ³ /año
Quema de biogás en antorcha	0 %
Quema de biogás en antorcha	0 m ³ /año
Utilización de biogás para generación eléctrica	100 %
Desvío de biogás para generación eléctrica	0 m ³ /año
PCI Biogás	0,0209 GJ/m ³
Eficiencia de generación de energía eléctrica	30 %
Generación de energía eléctrica	0 MWh/año

Consumo de energía y combustible	
Consumo de energía eléctrica en planta	21 MWh/año
Generación neta de energía eléctrica de exportación	0 MWh/año
Consumo de energía eléctrica de la red	21 MWh/año
Consumo de gas oil	84.019 L/año

Balance neto de energía	
Consumo neto de combustibles	3.248 GJ/año
Consumo neto de energía eléctrica	76 GJ/año
Consumo neto de energía	3.323 GJ/año

Emisiones					
	SDF	Energía	Combustibles	Antorcha	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emissiones al aire					
CO ₂ fósil	0	1	293	0	294
CH ₄	0	0	0	0,00	0,05
N ₂ O	0	0	0	0	0
SO _x	0	0	2	0,00	2,10
NO _x	0	0	1	0,00	0,61
HCl	0	0	0	0,000	0,001
NH ₃	0	0	0	0,00	0,00
Dioxinas y furanos	0	0	0	0,00E+00	2,52E-13
Hg	0	0	0	0,00E+00	1,33E-05
Emissiones al agua					
DQO	0,24	0,00	0,01	-	0,24
N total	4,90E-05	3,59E-07	1,10E-04	-	1,59E-04
P total	0,00E+00	3,03E-08	5,04E-04	-	5,04E-04
Dioxinas y furanos	2,94E-11	0,00E+00	0,00E+00	-	2,94E-11
Hg	9,80E-06	6,82E-11	9,86E-10	-	9,80E-06

COMENTARIOS

- El consumo de energía eléctrica incluye el tratamiento de lixiviados.
- En las emisiones en el sitio de disposición final están incluidas las fugas de biogás.

REFERENCIAS

- [a] Generación de biogás: McDougall-White. p. 504-505. Contenido de metano: McDougall-White. p. 507.
- [b] McDougall-White. p. 501.
- [c] McDougall-White. Para emisiones líquidas se asume una generación de 150 L de lixiviados por ton de MSW (p. 511) y una composición según Tabla 21.7. Para emisiones al aire Tabla 21.5 y 21.6. Quema antorcha: McDougall, Tabla 21.5 Alemania.

RESULTADOS

Emisiones							
	Recolección y transporte	Incineración	Plantas de clasificación	Reciclaje de materiales	Tratamiento biológico	Disposición final	Total
	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año	ton/año
Emisiones al aire	CO2 fósil	10.550	245.049	75	-162.065	-1.816	294
	CH4	1,57	-39,41	0,10	-163,26	-4,17	0,05
	N2O	0,0409	0,0000	0,0001	-0,2586	-1,4401	0,0011
	SOx	74,90	-101,25	0,77	-1.402,76	-21,58	2,10
	NOx	21,90	286,46	0,30	-459,38	7,46	0,61
	HCl	0,01	63,64	0,02	-6,73	-0,17	0,00
	NH3	0,01	-0,55	0,00	-4,65	49,94	0,00
	Dioxinas y furanos	9,05E-12	2,36E-05	3,03E-14	-5,12E-09	4,11E-08	2,52E-13
	Hg	4,80E-04	1,81E-02	1,61E-06	-1,05E-03	-5,29E-07	1,33E-05
	DQO	0,32	-4,87	0,01	156,10	2,08	0,24
Emisiones al agua	N total	3,94E-03	-6,40E-03	2,70E-05	7,04E-01	1,59E-04	9,12E-01
	P total	1,81E-02	1,50E-03	6,18E-05	-1,53E-02	2,11E-01	5,04E-04
	Dioxinas y furanos	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,94E-11	2,94E-11
	Hg	3,55E-08	-1,23E-06	2,74E-09	-1,84E-05	-1,18E-07	9,80E-06

Indicadores							
	Recolección y transporte	Incineración	Plantas de clasificación	Reciclaje de materiales	Tratamiento biológico	Disposición final	Total
Volumen ocupado en SDF (m3/año)	-	-	-	-	-	-	140.032
Tasa global de recuperación de materiales (%)	-	-	-	-	-	-	18,2
Consumo de combustibles en transporte (tep/año)	-	-	-	-	-	-	2.793
Consumo de combustibles (tep/año)	2.793	0	9	-34.555	-400	78	-32.075
Consumo de energía eléctrica (MWh/año)	-	-378.063	809	-187.315	-12.411	21	-576.960
Consumo neto de energía (GJ/año)	116.862	-1.361.027	3.302	-2.120.159	-61.409	3.323	-3.419.108
Emisión de dioxinas y furanos (kgPCDD-PCDF/año)	9,05E-09	0,023604054	3,02735E-11	-5,12213E-06	4,11093E-05	2,97E-08	2,36E-02
Emisión de mercurio (kgHg/año)	0,48	18,12	0,00	-1,07	0,00	0,02	17,56

Categorías de Impacto							
	Recolección y transporte	Incineración	Plantas de clasificación	Reciclaje de materiales	Tratamiento biológico	Disposición final	Total
Calentamiento global (tonCO2eq/año)	10.596	244.221	77	-165.573	-2.350	296	87.267
Acidificación (tonSO2eq/año)	90,3	154,2	1,0	-1.739,0	77,4	2,5	-1.413,6
Eutrofización (tonPO4/año)	2,9	36,9	0,0	-57,7	19,2	0,1	1,6

Poder de Calentamiento Global (a)	
	(kgC.O2eq/kg)
CO2	1
CH4	21
N2O	310

Poder de acidificación (b)	
	(kgSO2eq/kg)
SO2	1
NOx	0,7
HCl	0,88
NH3	1,88

Poder de acidificación (b)		
		(kgSO2eq/kg)
Emisiones al aire	NH3	0,36
	NOx	0,13
Emisiones al agua	N	0,42
	P	3,06
	DQO	0,022

REFERENCIAS

- (a) Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC)
 (b) Guinée, 2004, Table 4.3.10.2 - Heijungs (Backgrounds)
 (c) Guinée, 2004, Table 4.3.11.1 - Heijungs et al (Backgrounds)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alumex S.A. <http://www.alumex.com.uy/> (último ingreso en el año 2013).

Aluminios del Uruguay S.A. <http://www.aluminios.com/> (último ingreso en el año 2013).

Arena, U., Mastellone, M.L., Perugini, F., (2003). "The environmental performance of alternative solid waste management options: a life cycle assessment study". *Chemical Engineering Journal*. N°96, pp. 207-222.

Baere, Luc De. The DRANCO technology: a unique digestion technology for solid organic waste. *Organic Waste Systems nv.* (S/A).

Barrenechea, P., González, I., Croce, C., (2003). Estudio de mercado: materiales reciclables de residuos sólidos urbanos.

Beledo, L. División Limpieza de la IdeM. Economista. Entrevista realizada el día 16 de Octubre de 2012.

Bianchini, A., Pellegrini, M., Saccani, C., (2011). "Material and energy recovery in integrated waste management system - An Italian case study on quality of MSW data". *Waste Management*. . N°31, pp. 2066-2073.

Boer, J. den, Boer, E. den, Jager, J. (2007). "LCA-IWM: a decision support tool for sustainability assessment of waste management systems". *Waste Management*. N°27, pp. 1032-1045.

Broggi, L.E., (2011). “Inventario Nacional de Liberaciones de Mercurio”. *Proyecto Racional de Productos de Mercurio en Uruguay*. DINAMA/ONUDI/PNUMA/Centro de Basilea.

Burnley, S., et al., (2011). “Energy implications of the thermal recovery of biodegradable municipal waste materials in the United Kingdom”. *Waste Management*. N°31, pp. 1949-1959.

Buttol, P., et al, (2007). “LCA of integrated MSW management systems: case study of the Bologna District”. *Waste Management*. N°27, pp. 1059-1070.

Carlsson Reich, M., (2005). “Economic assessment of municipal waste management systems – Case studies using a combination of life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC)”. *Journal of Cleaner Production*. N°13, pp. 253-263.

CEMPRE, (2010). *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. 3ed. São Paulo, Brasil. ISBN 978-85-87345-02-8.

CEMPRE Uruguay. <http://www.cempre.org.uy> (último ingreso en el año 2013).

Chang, Y.H., Chen, W.C., Chang, N.B. (1998). “Comparative evaluation of RDF and MSW incineration”. *Journal of Hazardous Materials*. N°58, pp. 33-45.

Charbonie, F. División Limpieza de la IdeM. Jefe de la Regional Este. Entrevista realizada el día 12 de Setiembre de 2012.

Cherubini, F., Bargigli, S., Ulgiati, S., (2009). “Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: landfilling, sorting plant and incineration”. *Energy*. N°34, pp. 2116-2123.

Consonni, S., Giugliano, M., Grosso, M., (2005). “Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste. Part. A: mass and energy balances”. *Waste Management*. N°25, pp. 123-135.

Cristal Pet S.A. <http://www.cristalpet.com.uy/> (último ingreso en el año 2014).

CSI Ingenieros - Estudio Pittamiglio, (2011). Información de base para el diseño de un plan estratégico de residuos sólidos. Uruguay.

Depósito Pedernal S.A. <http://depositopedernal.com.uy/> (último ingreso en el año 2014).

DINAMA, (2002/2003). Inventario Nacional de Liberaciones de Dioxinas y Furanos. Plan Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo, Uruguay.

Dirección Nacional de Energía (DNE). Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM). Estadísticas energéticas:
<http://www.dne.gub.uy/publicaciones-y-estadisticas/energia-electrica/> (último ingreso en el año 2014).

Dirección Nacional de Energía (DNE). Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM). Política Energética 2005 – 2030:
<http://www.dne.gub.uy/documents/49872/0/Pol%C3%ADtica%20energ%C3%ADa>

A9tica%202005-2030?version=1.0&t=1378917147456 (último ingreso en el año 2014).

Dirección Nacional de Meteorología. Estadísticas Climatológicas:
<http://meteorologia.gub.uy/index.php/estcli> (último ingreso en el año 2014).

Dumas, R.D., (1999). Energy usage and emissions associated with electric energy consumption as part of a solid waste management life cycle inventory model. Revision 2. Department of Civil Engineering, North Carolina State University.

ECOPET S.A. <http://ecopet.net/2008/home.html> (último ingreso en el año 2013).

Ekvall, T., Assefa, G., Bjorklund, A. Eriksson, O., Finnveden, G., (2007). “What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management”. *Waste Management*. N°27, pp. 989-996.

European Environment Agency, (1997). *Life Cycle Assessment. A guide to approaches, experiences and information sources*. Environmental Issues Series N°6.

European Environment Agency, (2006). *Paper and cardboard – recovery or disposal? Review of life cycle assessment and cost-benefit analysis on the recovery and disposal of paper and cardboard*. Technical report N°5. ISBN 92-9167-783-3.

FICHTNER-LKSur, (2004). *Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana. Estudios Básicos. Tomo II: Residuos Sólidos Urbanos*. Programa de Saneamiento de Montevideo y Área Metropolitana. Tercera

Etapas Subproyecto. República Oriental del Uruguay - Oficina de Planeamiento y Presupuesto - Dirección de Proyectos de Desarrollo.

FICHTNER-LKS, (2005). *Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana. Plan Director. Tomo II: Residuos Sólidos Urbanos*. Programa de Saneamiento de Montevideo y Área Metropolitana. Tercera Etapa Subproyecto. República Oriental del Uruguay - Oficina de Planeamiento y Presupuesto - Dirección de Proyectos de Desarrollo.

Finnveden, G., (1999). "Methodological aspects of life cycle assessment of integrated solid waste management systems". *Resources, Conservation and Recycling*. N°26, pp. 173-187.

Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., Moberg, A., (2005a). "Life cycle assessment of energy from solid waste – part 1: general methodology and results". *Journal of Cleaner Production*. N°13, pp. 213-229.

Finnveden, G., Moberg, A., Johansson, J., Lind, P., (2005b). "Life cycle assessment of energy from solid waste – part 2: landfilling compared to other treatment methods". *Journal of Cleaner Production*. N°13, pp. 231-240.

Gerdau S.A. http://www.gerdau.com.uy/index_1.html (último ingreso en el año 2014).

González, M.J. CEMPRE Uruguay (Compromiso Empresarial para el Reciclaje). Entrevista realizada el día 19 de Setiembre de 2012.

González, M.J., Nario, A., Azpiroz, J., (2013). Proceso técnico y político para la definición de una estrategia para instrumentar una solución

consensuada a la disposición final de residuos urbanos en el Uruguay. 5º Congreso Interamericano de Residuos Sólidos.

Guinée, J.B., (2004). *Handboook on Life Cycle Assesment. Operational guide to the ISO Standards.* Kluwer Academic Publishers. ISBN: 1-4020-0228-9.

Heijungs, R., Guinée, J.B., Huppes, G., Lankreijer, R.M., Udo de Haes, H.A., Wegener Sleeswijk, A., (1992). *Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds.* Leiden. Centre of Environmental Science. ISBN 90-5191-064-9.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). Censos 2011:
<http://www.ine.gub.uy/censos2011/index.html> (último ingreso en el año 2013).

Intendencia de Canelones. Noticias:
<http://www.imcanelones.gub.uy/?q=node/7621>

Intendencia de Montevideo. División Limpieza. Plano de circuitos de recolección de residuos:
<http://www.montevideo.gub.uy/ciudadania/desarrollo-ambiental/limpieza/>
(último ingreso en el año 2013).

Intendencia de Montevideo. División Limpieza. Plano de ubicación de contenedores de materiales reciclables:
<http://www.montevideo.gub.uy/ciudadania/desarrollo-ambiental/limpieza/contenedores/> (último ingreso en el año 2014).

Intendencia de Montevideo. Plan “Tu envase nos sirve”:
<http://www.montevideo.gub.uy/ciudadania/campanas/tu-envase-sirve> (último ingreso en el año 2014).

Intendencia de Montevideo - PNUD/PNUMA, (2012). *Caracterización de la población de clasificadores de residuos de Montevideo*. Montevideo, Uruguay. 2012. ISBN 978-92-990064-7-4.

International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). RAINS Model (Regional Air Pollution Information and Simulation): <http://www.iiasa.ac.at/> (ultimo ingreso en el año 2014).

ISO/TR 14047, (2012). Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations. 2nd ed.

ISO/TR 14048, (2002). Environmental management - Life cycle assessment - Data documentation format. 1st ed.

ISO/TR 14049, (2012). Environmental management - Life cycle assessment - Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis. 2nd ed.

Komilis, D., Ham, R., (2000). *Life cycle inventory and cost model for mixed municipal and yard waste composting*. University of Wisconsin. Research Triangle Institute.

Liamsanguan, C., Gheewala, S.H., (2008). "LCA: a decision support tool for environmental assessment of MSW management systems". *Journal of Environmental Management*. N°87, pp. 132-138.

LKSur – ALUR – MIEM/DNE. Presentación del estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos con Fines Energéticos el día 17 de Mayo de 2013 en las instalaciones de la DNE.

Matsui, Y., Tanaka, M. y Ohsako, M., (2007). “Study of the effect of political measures on the citizen participation rate in recycling and on the environmental load reduction”. *Waste Management*. N°27, pp. S9-S20.

McDougall, F.R., White, P.R., (2004). *Gestión Integral de Residuos Sólidos: Inventario de Ciclo de Vida*. Procter & Gamble Industrial, S.C.A. ISBN 980-12-0829-5.

Merrild, H., Damgaard, A., Christensen, T.H., (2008). “Life cycle assessment of waste paper management: the importance of technology data and system boundaries in assessing recycling and incineration. *Resources, Conservation and Recycling*. N°52, pp. 1391-1398.

Merrild, H., Damgaard, A., Christensen, T.H., (2009). “Recycling of paper: accounting of greenhouse gases and global warming contributions”. *Waste Management & Research*. N° 27, pp. 746-753.

Metcalf & Eddy (1996). *Ingeniería de las aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. Tomo I*. McGraw-Hill, Inc. USA. ISBN 970-10-1005-1.

Montejo, C., Costa, C., Ramos, P., Márquez, M., (2011). “Analysis and comparison of municipal solid waste and reject fraction as fuels for incineration plants”. *Applied Thermal Engineering*. N°31, pp. 2135-2140.

Municipio CH. Recolección selectiva de residuos secos:
<http://municipioch.montevideo.gub.uy/clasifica>

MVOTMA - DINAMA - Unidad de Cambio Climático, (2006). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2002*. Proyecto URU/05/G32 - FMAM - PNUD.

National Renewable Energy Laboratory. <https://www.lcacommons.gov/nrel/> (último ingreso en el año 2014).

Organic Waste System (OWS N.V.). Sistema DRANCO:
http://www.ows.be/household_waste/dranco/ (ultimo ingreso en el año 2014).

Panel Inetrubernamental para el Cambio Climático (IPCC):
<https://www.ipcc.ch/index.htm> (último ingreso en el año 2013).

Penido Monteiro, J.H., (2006). *Manual de gestión integrada de residuos sólidos municipales en ciudades de América Latina y el Caribe.*

Presidencia de la República Oriental del Uruguay, (2007). *Libro Blanco del Área Metropolitana.*

REPAPEL. <http://www.repapel.org/> (último ingreso en el año 2014).

Research Triangle Institute. Municipal Solid Waste Decision Support Tool:
<https://mswdst.rti.org/tutorial.htm> (último ingreso en el año 2014).

Rigby, H., Smith, S., (2011). *New markets for digestate from anaerobic digestion.* Waste & Resources Action Programme (WRAP). Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London.

Rotondaro Ltda. <http://rotondaro.com.uy/blog/es> (último ingreso en el año 2013).

RTI International, (2003). *Life-cycle inventory data sets for material production of aluminum, glass, paper, plastic and steel in North America.*

Sanchez, R., Villalba, L., Mora, W., Hernández, R., (2000). “Aplicación de la técnica inventario de ciclo de vida (ICV) en el desarrollo de sistemas para el manejo integrado de desechos sólidos municipales. Caso de estudio: Municipio Caroní, Estado de Bolívar, Venezuela - Resultados preliminares”. *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitaria e Ambiental*. Porto Alegre.

Schlamadinger, B., Apps, M., Bohlin, F., Gustavsson, L., Jungmeier, G., Marlnad, G., Pingoud, K., Savolainen, I., (1997). “Towards a standard methodology for greenhouse gas balances of bioenergy systems in comparison with fossil energy systems”. *Biomass and bioenergy*. Nº 6, pp. 359-375.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. McGraw-Hill/Interamericana de España S.A. ISBN: 84-481-1766-2.

Themelis – Diaz, (2012). *Estudio de prefactibilidad técnica y económica para la instalación de capacidad de generación de energía a partir de residuos (WTE) en Uruguay*. Themelis Associates.

Thomas, B., McDougall, F., (2005). “International expert group on life cycle assessment for integrated waste management”. *Journal of Cleaner Production*. Nº13, pp. 321-326.

Thorneloe, S., (2000a). *Default data and data input requirements for the municipal solid waste management decision support tool*. North Carolina State University - Research Triangle Institute.

Thorneloe, S., (2000b). *A decision support tool for assessing the cost and environmental performance of integrated municipal solid waste management strategies. Users manual.* North Carolina State University - U.S. Environmental Protection Agency. Research Triangle Institute.

Thorneloe, S.A., Weitz, K., Jambeck, J. (2007). “Application of the US decision support tool for materials and waste management”. *Waste Management*. N°27, pp. 1006-1020.

Ugliati, S., Raugeli, M., Bargigli, S., (2006). “Overcoming the inadequacy of single-criterion approaches to Life Cycle Assessment”. *Ecological Modeling*. N°190, pp. 432-442.

Unidad de Cambio Climático - DINAMA – MVOTMA, (2010). *Tercera comunicación nacional a la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.* Uruguay, Proyecto URU/05/G32 - FMAM – PNUD.

UNIT-ISO 14040:2006. Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia.

UNIT-ISO 14044:2006. Gestión Ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices.

Universal Plastic S.A. <http://www.universalplastic.com.uy/> (último ingreso en el año 2013).

US EPA, (1997). *Full Cost Accounting for Municipal Solid Waste Management: a handbook.* Solid Waste and Emergency Response.

US EPA, (1998). *Greenhouse gas emissions from management of selected materials in municipal solid waste.* Solid Waste and Emergency Response.

Wenisch, S., Rousseaux, P., Métivier-Pignon, H., (2004). "Analysis of technical and environmental parameters for waste-to-energy and recycling: household waste case study". *International Journal of Thermal Sciences*. N°43, pp. 519-529.

Werba S.A. <http://www.werbasa.com/> (último ingreso en el año 2013).

Winkler, J., Bilitewski, B., (2007). "Comparative evaluation of life cycle assessment models for solid waste management". *Waste Management*. N°27, pp. 1021-1031.

Zhang, D.Q., Soon, K., Gersberg, R.M., (2010). "Municipal solid waste management in China: status, problems and challenges". *Journal of Environmental Management*. N°91, pp. 1623-1633.