



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

De residuos a recursos: articulando lo ambiental, lo social y lo económico

División de Agua y
Saneamiento

NOTA TÉCNICA N°
IDB-TN-2287

Autores:

Mariana Robano

María José González

Editores:

Virginia Pardo

Cecilia Maroñas

Nicolás Rezzano

Marcello Basani

Septiembre 2021



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

De residuos a recursos: articulando lo ambiental, lo social y lo económico

Autores:

Mariana Robano

María José González

Editores:

Virginia Pardo

Cecilia Maroñas

Nicolás Rezzano

Marcello Basani

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Agua y Saneamiento

Septiembre 2021

**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

De residuos a recursos: articulando lo ambiental, lo social y lo económico / Mariana Robano, María José González; editores, Virginia Pardo, Cecilia Maroñas, Nicolás Rezzano y Marcello Basani.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2287)

1. Refuse and refuse disposal-Economic aspects-Uruguay. 2. Refuse and refuse disposal-Environmental aspects-Uruguay. 3. Refuse and refuse disposal-Social aspects-Uruguay. 4. Waste disposal sites-Uruguay. 5. Recycling (Waste, etc.)-Uruguay. I. Robano, Mariana. II. González, María José. III. Pardo, Virginia, editora. IV. Maroñas, Cecilia, editora. V. Rezzano, Nicolás, editor. VI. Basani, Marcello, editor. VII. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Agua y Saneamiento. VIII. Serie. IDB-TN-2287

Palabras clave: Residuos sólidos, recursos, economía circular, innovación, Uruguay

Códigos JEL: Q53, Q55, Q58

<http://www.iadb.org>

Copyright © [2021] Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

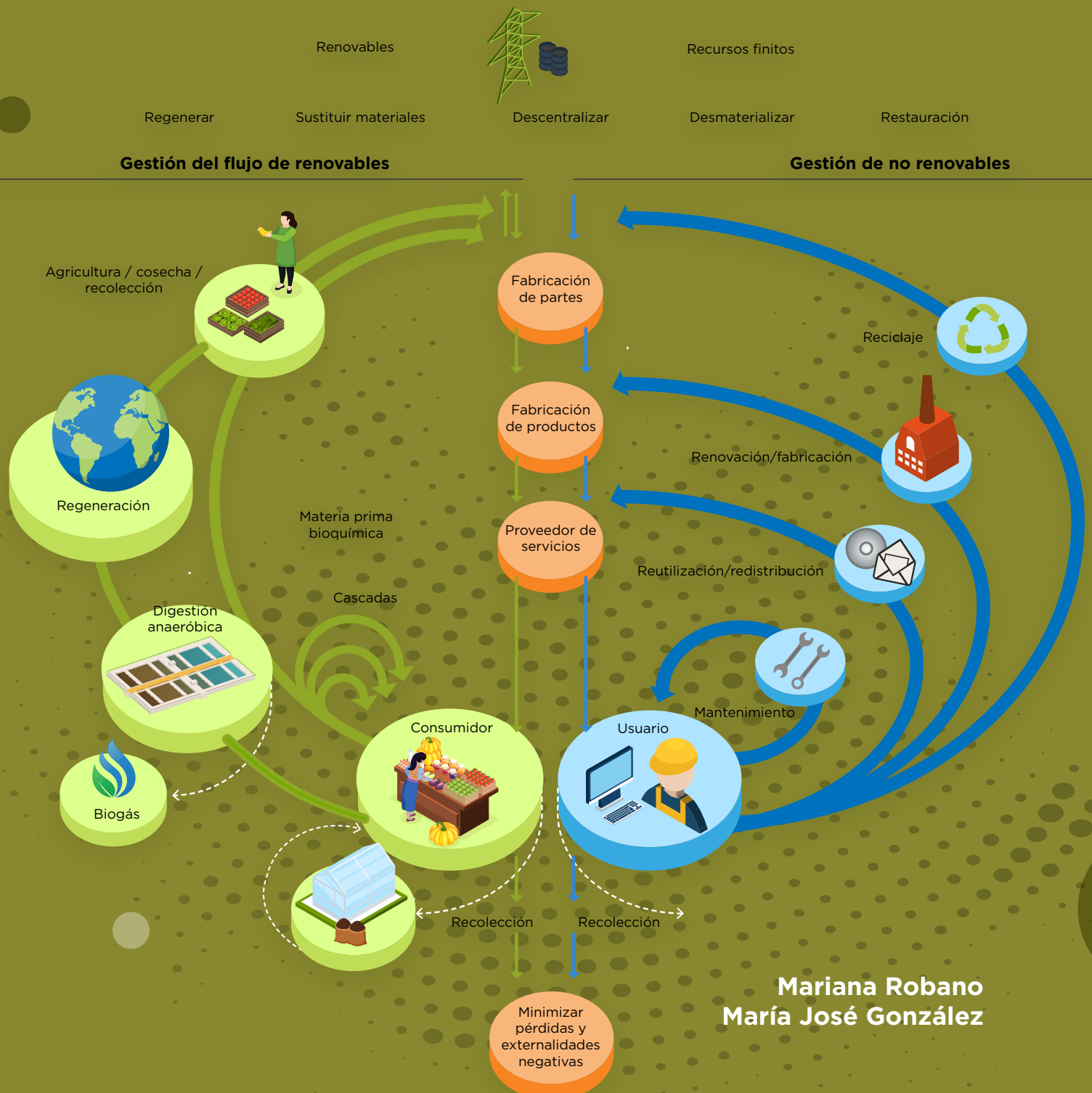
Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



DE RESIDUOS A RECURSOS

Articulando lo ambiental,
lo social y lo económico



Mariana Robano
María José González

ÍNDICE

	Acrónimos y siglas	iii
	Presentación	iv
	Conceptos	v
1	<u>Acerca de esta publicación</u>	1
2	<u>La gestión de residuos en América Latina y el Caribe: desafíos y oportunidades</u>	3
	2.1. El desafío ambiental.....	5
	2.2. La dimensión social.....	5
	2.3. La limitación económica.....	6
	2.4. El potencial y el desafío de la adopción de nuevas tecnologías.....	7
	2.5. La mirada integradora.....	7
3	<u>Análisis de alternativas de valorización</u>	8
	3.1. Análisis costo-beneficio.....	8
	3.2. Análisis multicriterio.....	9
	3.3. Comparación de metodologías.....	12
4	<u>Montevideo: estudio de caso</u>	13
	4.1. Diagnóstico de ingresos para disposición final.....	14
	4.2. Escenarios estudiados.....	18
	4.3. Resultados.....	26
	4.4. Conclusiones y recomendaciones para el caso de Montevideo.....	32
5	<u>Reflexiones finales</u>	34
	Referencias	37
	Anexo	39

ACRÓNIMOS Y SIGLAS

ACB	Análisis costo-beneficio
ALC	América Latina y el Caribe
AMC	Análisis multicriterio
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BioCDR	Biocombustible derivado de residuos
CAPEX	Inversión en capital (<i>capital expenditure</i>)
CDR	Combustible derivado de residuos
CIU	Cámara de Industrias del Uruguay
Dinacea	Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental
DNE	Dirección Nacional de Energía
EIU	<i>The Economist Intelligence Unit</i>
IDM	Intendencia de Montevideo
IRP	<i>International Resource Panel</i>
IRR	Iniciativa Regional para el Reciclaje Inclusivo
ISWA	<i>International Solid Waste Association</i>
MIEM	Ministerio de Industria, Energía y Minería
ONU	Organización de las Naciones Unidas
OPEX	Costos de funcionamiento (<i>operational expenditure</i>)
PRM	Planta de recuperación de materiales
REP	Responsabilidad extendida del productor
TIR	Tasa interna de retorno
TMB	Tratamiento mecánico biológico
TIRE	Tasa interna de retorno económico
VAN	Valor actual neto
VANE	Valor actual neto económico
WTE	<i>Waste-to-energy</i> (residuos a energía)

PRESENTACIÓN

Esta publicación forma parte de la serie “Aportes para impulsar la economía circular y mejorar la gestión de los residuos sólidos en Uruguay”.

En los últimos años Uruguay ha tenido significativos avances en varias corrientes relacionadas con los residuos sólidos (sanitarios, peligrosos, neumáticos fuera de uso, agroenvases). Sin embargo, en el marco de la nueva Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos aprobada en septiembre de 2019, así como en el contexto de la pandemia provocada por la difusión de la COVID-19, han surgido desafíos que se deben abordar para asegurar una gestión sostenible y la implementación del principio de economía circular.

En este escenario, el objetivo de la serie es presentar elementos de reflexión sobre el statu quo, así como perspectivas y posibles líneas de acción para afrontar dichos desafíos. De este modo, se han estudiado cinco temáticas sobre la gestión de residuos sólidos en Uruguay:

- **De residuos a recursos: Articulando lo ambiental, lo social y lo económico.**
- **De residuos a recursos: Residuos de construcción y demolición en Montevideo.**
- **Hacia un reciclaje inclusivo: Experiencias y desafíos de la formalización de clasificadores de residuos en Montevideo.**
- **Regionalización de rellenos sanitarios: El caso de Uruguay.**
- **Una gestión de residuos sólidos resiliente frente a la emergencia sanitaria: El caso de Uruguay.**

Estas publicaciones no habrían sido posibles sin los aportes de distintas instituciones, como la Intendencia de Montevideo, la Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental (Dinacea), la Cámara de la Construcción del Uruguay, así como de sus autoridades y cuerpos técnicos.

Si esta serie de publicaciones sirve para dar nuevos pasos hacia un sistema de gestión de residuos sólidos inclusivo, circular, eficiente y eficaz en Uruguay, y permite brindar elementos metodológicos para la mejora de la gestión de residuos sólidos en la región, su objetivo estará cumplido.

Editores técnicos: Virginia Pardo, Cecilia Maroñas, Nicolás Rezzano y Marcello Basani.

Un reconocimiento especial a los revisores de pares de este documento: Alessandra Tiribocchi, Gustavo Solorzano, Magda Correal y Alfredo Rihm.

CONCEPTOS

A los efectos de esta publicación, y con el objetivo de aportar a la unificación y homogeneización terminológica en América Latina y el Caribe (ALC), se definen los siguientes conceptos:

Recuperadores informales. Frente a la gran variedad de términos que existe en ALC para referirse a clasificadores/as, recicladores/as, pepenadores/as o catadores/as y teniendo en cuenta la terminología utilizada en el documento *Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe* de ONU Medio Ambiente, se optó por emplear la fórmula “recuperadores informales”, ya que, si bien constituyen un segmento muy importante de la cadena de reciclaje, su actividad es la recuperación y/o acopio de materiales.

Residuos sólidos urbanos (RSU). Según distintos documentos oficiales, la definición de residuos sólidos urbanos (RSU) en la región se refiere de manera integral a los que provienen de fuentes domésticas o domiciliarias, de la limpieza pública y de fuentes comerciales e institucionales. El presente estudio aborda los residuos generados en los domicilios y en actividades de limpieza pública urbana, y el término RSU solo es utilizado para aludir a datos de la región. En el estudio no se incluyen residuos de comercios o industrias.

Responsabilidad extendida del productor (REP). Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), es un enfoque de política ambiental en el cual la responsabilidad del productor por un producto se extiende hasta el fin del ciclo de vida del producto. Se caracteriza por la transferencia de responsabilidad (física y/o económica, completa o parcial) hacia el productor y el suministro de incentivos a los productores para que tengan en cuenta consideraciones ambientales desde la etapa del diseño del producto. Esta es la fórmula más frecuentemente usada en los países de la región. Se considera que el concepto “productor” incluye a fabricantes e importadores, por razones prácticas, de manera que solo se refiere a uno de los actores involucrados.

Basurales. En algunos países de habla hispana, el término “vertedero” es sinónimo de “relleno sanitario”, por lo que, cuando se quiere mencionar un basural, habría que agregar “a cielo abierto” para evitar confusiones. El *Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe 2010* (Martínez Arce, Daza y Tello Espinoza, 2011) distingue entre vertedero *controlado* y vertedero *a cielo abierto*. El presente trabajo utiliza el término “basural”, entre otros motivos, por razones de economía textual.

ACERCA DE ESTA PUBLICACIÓN

Los desafíos que enfrentan los sistemas de gestión integral de residuos en América Latina y el Caribe (ALC), desde el punto de vista ambiental, social y económico, son de gran magnitud, máxime si se considera la diversidad de tecnologías ofrecida a los gobiernos nacionales y/o locales, muchas de las cuales carecen de un análisis claro de factibilidad para cada situación particular y/o se encuentran en etapas de desarrollo aún incipientes.

El presente trabajo forma parte de una serie de publicaciones impulsadas por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el marco de un conjunto de estudios financiados para Uruguay, cuya experiencia puede ser aprehendida para replicar este tipo de análisis en otros países de ALC.

La serie en que se inscribe esta publicación aborda los desafíos actuales de la región en materia de residuos e incluye los siguientes títulos: i) *De residuos a recursos*; ii) *Regionalización de rellenos sanitarios*; iii) *Plan estratégico de residuos de construcción*, y iv) *Una gestión resiliente a la emergencia sanitaria: el caso de Montevideo*. En la presente publicación (*De residuos a recursos*), la primera de la serie, se propone un camino metodológico para la definición de una estrategia de valorización de residuos sólidos domiciliarios y de limpieza de espacios públicos¹ mediante la aplicación de dos metodologías: *análisis costo-beneficio* y *análisis multicriterio*.

¹ La Ley 19.829/19 en Uruguay define los conceptos de “residuos domiciliarios” y “residuos de limpieza de espacios públicos”, pero deja fuera el de “residuos sólidos urbanos”.

Este recorrido tiene el objetivo de ofrecer elementos de reflexión que faciliten la toma de decisiones de las autoridades locales y nacionales a la hora de examinar las distintas alternativas de valorización de residuos que se encuentran disponibles a nivel comercial. El público al que se dirige, entonces, está constituido por personal técnico, profesionales y encargados(as) de la toma de decisiones que se hallen vinculados a la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe.

Como se anticipó, este trabajo se basa en un estudio realizado para la ciudad de Montevideo (Uruguay) por el Departamento de Desarrollo Ambiental de la Intendencia de Montevideo y el BID. Dicho estudio se enmarcó en la consultoría realizada durante 2019, que tuvo como objetivo principal el *Diseño del plan estratégico de valorización y disposición de residuos sólidos para Montevideo* (Colturato et al., 2019). Este camino metodológico es una aproximación inicial que sería recomendable complementar y profundizar con estudios técnicos y de mercado, aplicados a la realidad local de cada caso.

Para seleccionar la mejor tecnología de valorización para la ciudad de Montevideo se compararon seis escenarios, cada uno de ellos con combinaciones de distintas tecnologías de valorización de residuos. Y si bien los resultados encontrados son específicos para la realidad local, tales hallazgos permiten identificar algunos elementos y recomendaciones relevantes para la toma de decisiones.

Durante todo el proceso acaecido en Montevideo, los resultados de cada etapa se fueron examinando y validando con los equipos técnicos de la Intendencia de Montevideo y la Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental (Dinacea). Finalmente, se realizó un taller con un grupo amplio de referentes nacionales (técnicos de los sectores privado y público, empresas operadoras de residuos y plantas cementeras y de compostaje, entre otros), donde se presentaron los resultados obtenidos y se analizaron los pasos por seguir.

Las autoras destacan y agradecen el profesionalismo y el compromiso del trabajo efectuado por los consultores Felipe Colturato y Carlos Troncoso durante el desarrollo de la consultoría que da marco a la presente publicación. Asimismo, desean expresar su gratitud con el equipo técnico del departamento de Desarrollo Ambiental de la Intendencia de Montevideo por el esfuerzo en el contexto de la Cooperación Técnica con el BID y con los más de 30 referentes nacionales e internacionales que hicieron aportes para definir los elementos de ponderación técnica de las diferentes alternativas consideradas.



LA GESTIÓN DE RESIDUOS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE:

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES

Para 2025 la generación de residuos en América Latina y el Caribe (ALC) alcanzará un crecimiento exponencial de más del 60%, razón por la cual su adecuada gestión constituye uno de los mayores retos para la sostenibilidad de la región, según lo investigado en el informe *Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe* (ONU Medio Ambiente, 2018).

En ALC las soluciones para mejorar dicha gestión se han abordado de forma tardía y han priorizado la disposición en terreno de la casi totalidad de los residuos generados. Según el informe regional elaborado en forma conjunta por el BID, la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS) para 2010, el 27% de los residuos de ALC son depositados en basurales, a pesar de los esfuerzos efectuados lo largo de los años para transitar hacia una disposición controlada en rellenos sanitarios (Martínez Arce, Daza y Tello Espinoza, 2011). La disposición en terreno es el destino del 90% de los



residuos, con tasas de reciclaje que aún resultan bajas y que oscilan entre el 1% y el 20% (ONU Medio Ambiente, 2018). Este tipo de soluciones impide que los materiales que todavía pueden ser utilizados en procesos productivos sean recuperados, lo que redundaría en la necesidad de extraer una mayor cantidad de materiales vírgenes para la elaboración de los nuevos productos.

Por otra parte, la escasez de recursos se vuelve día a día más evidente, tanto porque su disponibilidad se encuentra cada vez más limitada, como por estar situados en zonas donde su presencia conlleva contextos geopolíticos más complejos que dificultan su extracción. En este sentido, es posible afirmar que el 90% de la pérdida de biodiversidad y del estrés hídrico a nivel global se deben a la extracción y procesamiento de recursos naturales (IRP, 2019), un panorama que lleva a replantearse las soluciones tradicionales con el propósito de ser más eficientes en la forma de utilizar los recursos y direccionar los esfuerzos orientados a minimizar su extracción y maximizar su aprovechamiento. Asimismo, parece necesario revisar los actuales patrones de producción y consumo, con el importante desafío de romper el vínculo entre crecimiento económico y explotación de recursos naturales.

Finalmente, una gran parte de los recursos extraídos se convierte en residuos descartados: un 50% del total de residuos generados en los domicilios corresponde principalmente a desperdicios de alimento y, en menor medida, a restos de jardinería, y cerca del 30% son recursos que pueden ser reutilizados en nuevos procesos de producción (para plásticos, metales, vidrios, papel y cartón) ya que conservan sus propiedades y cualidades.² La economía circular³ propone una mirada en la que los residuos son vistos como recursos, lo cual implica desarrollar diseños más inteligentes, procesos productivos nuevos y estrategias innovadoras que hagan posible su gestión. Sin embargo, para abordar la gestión de residuos como una oportunidad para el aprovechamiento de recursos se requiere voluntad política y enfrentar desafíos en varios niveles (ambientales, sociales, económicos y tecnológicos).

2 Conclusiones de las autoras con base en los estudios de composición de residuos realizados por Martínez Arce, Daza y Tello Espinoza (2011), LKSur (2015) y ONU Ambiente (2018).

3 De acuerdo con Ellen MacArthur Foundation (2015), una economía circular es un enfoque sistémico del desarrollo económico diseñado para beneficiar a las empresas, la sociedad y el medio ambiente. [...] Una economía circular es regenerativa por diseño y tiene como objetivo desacoplar gradualmente el crecimiento del consumo de recursos finitos [...] manteniendo los materiales y productos en uso, extendiendo su vida útil mediante diversas acciones como reutilización, reparación, remanufactura y reciclaje (lo que se denomina ciclo técnico) o maximizando el aprovechamiento de los distintos compuestos presentes en los recursos de origen biológico extraídos y retornándolos a los ecosistemas de una forma balanceada (lo que se denomina ciclo biológico) (traducido y adaptado por las autoras a partir de Ellen MacArthur Foundation, 2015).



2.1. EL DESAFÍO AMBIENTAL

A pesar de que las alternativas que existen para la valorización de residuos apuntan a alcanzar una mejora ambiental, aún presentan importantes desafíos que deben ser considerados. Entre los más importantes se destacan los vinculados a las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes orgánicos persistentes (COP),⁴ los efluentes líquidos con altas cargas contaminantes, los problemas de malos olores y los altos consumos energéticos. Por otra parte, las diferentes tecnologías involucran distintos niveles de aprovechamiento de recursos, generando un volumen de rechazo que no tiene una opción viable de valorización y por lo tanto continúa demandando la solución de disposición final en relleno sanitario.

Una buena proporción de las razones que explican los altos niveles de rechazo en la valorización de residuos sólidos urbanos tiene que ver con envases y embalajes que no fueron diseñados para una potencial valorización luego de ser utilizados. Una inadecuada selección del material, así como la mezcla entre sus distintos tipos (por ejemplo, plásticos con metales), dificultan las alternativas de recuperación. Además, cuando la clasificación de materiales en los hogares no se realiza de forma apropiada, se perjudica su calidad, limitando la capacidad que tienen para ingresar en un nuevo proceso productivo.

2.2. LA DIMENSIÓN SOCIAL

Desde hace muchos años, parte del sector industrial ha reconocido el potencial de que disponen los residuos para transformarse en un recurso valioso, así como lo han hecho las personas que viven en situación de vulnerabilidad y que los recuperan por su valor comercial. En toda ALC, estos recuperadores viven y se identifican con el oficio de clasificar residuos, un escenario que generalmente se presenta en un contexto de informalidad, en sectores excluidos socialmente, cuyos integrantes obtienen ingresos marginales dentro de la cadena de valorización de los materiales. Según la Iniciativa Regional para el Reciclaje Inclusivo (IRR), en América Latina y el Caribe 4 millones de personas viven de la recolección y segregación informal de residuos (EIU, 2017).

⁴ Los contaminantes orgánicos persistentes (COP) son sustancias químicas que afectan la salud humana y el medio ambiente y que combinan las siguientes características: i) persistencia, es decir que permanecen en el ambiente porque son resistentes a la degradación; ii) bioacumulación, ya que se incorporan en los tejidos de los seres vivos, pudiendo aumentar de concentración en los niveles más altos de la cadena trófica; iii) tóxicos, porque generan efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente, y iv) pueden recorrer largas distancias, alcanzando regiones en las que nunca se han producido o utilizado. Fuente: Convenio de Estocolmo (<http://ccbasilea-crestocolmo.org.uy/estocolmo/>).



La formalidad, por otro lado, aumenta los costos e instaure restricciones que no siempre son aceptadas por las personas que viven de la recolección y la clasificación informal,⁵ una realidad que se impone y establece el desafío de buscar soluciones creativas que permitan incluir esta actividad en un marco de salud y seguridad social.

También a nivel colectivo han surgido desafíos relevantes, ya que cualquier estrategia de valorización requiere una correcta segregación en origen. Resulta claro que cuanto más precisa sea la forma de separar los residuos en origen, mayor será la posibilidad de recuperación del material y su valor monetario. Por esta razón, un elemento clave consiste en aumentar las inversiones destinadas a impulsar la educación ambiental y la sensibilización de la población, de manera que las personas entiendan su responsabilidad como generadoras de residuos, la importancia de su participación en dicha cadena de valor y la obligación de solventar los costos de una adecuada gestión con base en el principio de que “quien contamina paga”.

2.3. LA LIMITACIÓN ECONÓMICA

Las alternativas para valorizar residuos presentan amplios rangos de inversión y costos de operación, dependiendo del tipo de tecnología que se considere. Por ejemplo, la valorización energética con base en la incineración de residuos requiere importantes montos de inversión y un volumen mínimo de residuos para que sea factible; además, la tarifa de dicha gestión se encuentra directamente vinculada con el precio de venta de la energía (Pinesseau et al., 2018), el cual depende de la matriz energética de cada país o región y de sus precios de mercado. Otros tipos de recursos, como los materiales reciclables y los nutrientes de la materia orgánica, pueden presentar limitaciones a la hora de encontrar mercados para su comercialización, razón por la cual los esfuerzos que se realicen para hacerla viable pueden obtener magros resultados si el tema no es abordado de forma integral.

En la actualidad, todas las tecnologías validadas a nivel comercial implican costos más elevados que la disposición en terreno bajo la modalidad de relleno sanitario, por lo que la mayoría de las veces son dejadas de lado en función de esta última (Colturato et al., 2019).⁶ Esta visión financiera –y segmentada– del problema es la que ha primado en las últimas décadas, una perspectiva que deja de lado el valor de los impactos intangibles –que son más difíciles de cuantificar y monetizar–, como

⁵ Según información recogida en la experiencia del Plan de Gestión de Envases en Uruguay, relevado por las autoras en los inicios de su implementación, y en entrevistas personales con los miembros del Comité de Seguimiento del Plan de Gestión de Envases.

⁶ Esto se debe especialmente a la incorporación de tecnologías de mayor complejidad que el enterramiento controlado y, por lo tanto, de mayor costo de inversión y de operación. Sin embargo, el aumento de las exigencias ambientales en materia de rellenos sanitarios (paquetes impermeables más robustos, captura de biogás y remoción de metales pesados de los lixiviados mediante plantas de tratamiento más sofisticadas) ha ido disminuyendo esta brecha.



la falta de espacio, la calidad de los cursos de agua, las emisiones a la atmósfera, la pérdida de recursos y la afectación de la población cercana, así como los potenciales ahorros en la gestión municipal por las mejoras en la gestión.

2.4. EL POTENCIAL Y EL DESAFÍO DE LA ADOPCIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS

Hoy por hoy la innovación tecnológica cobra cada vez más relevancia, ya que se encuentra impulsada tanto por la industria 4.0, como por el crecimiento económico de las principales potencias que compiten por un mejor posicionamiento frente a los desafíos futuros. En efecto, la permanente aparición de nuevas tecnologías y soluciones vinculadas a la robótica vuelve más sencillas las alternativas que, antes, resultaban más complejas (ISWA, 2018).

La variedad de opciones tecnológicas constituye un verdadero desafío para los países, en especial para aquellos que se encuentran en desarrollo y no tienen margen para el *ensayo y error* en temas con tanta relevancia social y ambiental como la gestión de residuos. Además, el número de tecnologías de valorización de residuos continúa en crecimiento, con nuevas alternativas en etapa exploratoria. En ese contexto, y en virtud de las características socioeconómicas de los países de ALC, lo más recomendable sería elegir tecnologías que estén validadas a nivel comercial (comúnmente denominadas “tecnologías probadas”) y que tengan la suficiente flexibilidad para adaptarse a las futuras modificaciones, dejando las puertas abiertas para los nuevos desarrollos. Como se demuestra a continuación, dichas tecnologías requieren una tarifa de gestión que varía de acuerdo a las particularidades de cada país, en función de la composición de los residuos y de los mercados existentes para los subproductos obtenidos.

2.5. LA MIRADA INTEGRADORA

Las soluciones en materia de valorización de recursos solo podrán venir de la mano de una visión integral, que aborde el tema transversalmente y no como si se tratara de compartimentos estancos y en tensión (por ejemplo, bajo la dicotomía desarrollo económico vs. ambiente). Además, para lograr un auténtico desarrollo sostenible, se requiere una visión de largo plazo, donde las externalidades ambientales sean puestas sobre la mesa y los distintos actores involucrados en el ciclo de vida de los productos participen de la solución para reinsertar los materiales y recursos en un nuevo proceso productivo. A continuación, se presenta un análisis de distintas alternativas, con el objetivo de que sirva de guía a la hora de elegir entre una o más tecnologías combinadas de acuerdo a las particularidades de cada caso.



ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN

Teniendo en cuenta el gran abanico de posibilidades tecnológicas que existe en materia de valorización de residuos, se proponen dos metodologías complementarias de análisis orientadas a facilitar, desde distintas perspectivas, la toma de decisiones. Estas metodologías buscan brindar información objetiva y técnica, la que luego deberá ser evaluada desde el ámbito político, considerando las condiciones particulares del contexto local. Las metodologías propuestas son el análisis costo-beneficio (ACB) y el análisis multicriterio (AMC).

3.1. ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

El ACB es el método por excelencia en la evaluación de proyectos de inversión, ya que constituye una herramienta que permite evaluar la eficiencia de las decisiones acerca del uso de recursos escasos para llevar adelante un proyecto. En términos generales, esta modalidad considera los beneficios y costos de un determinado escenario tecnológico: elabora un flujo de fondos para obtener un valor de la generación de riqueza, evalúa el costo de oportunidad de asignar recursos a ese escenario y brinda la información necesaria para concluir si con su ejecución se obtendrán buenas condiciones para la inversión realizada. Los beneficios y costos considerados incluyen únicamente a aquellos que son susceptibles de ser expresados en términos monetarios. El flujo de beneficios y costos se basa en un estudio incremental, también denominado “con y



sin proyecto”. Para analizar la conveniencia de realizar una inversión, principalmente se emplean dos indicadores: el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).⁷ En este marco, el término “proyecto” refiere a las diferentes combinaciones tecnológicas de valorización y disposición final de residuos sólidos municipales que se encuentran plasmadas en los distintos escenarios examinados.

Existen diferentes enfoques para realizar el ACB, según se ponga el énfasis en la inversión (enfoque financiero), el inversionista o la economía en su conjunto (enfoque socioeconómico).⁸ Con el propósito de realizar un análisis que facilite la toma de decisiones vinculadas a las políticas públicas, la presente propuesta utiliza un enfoque que incluye al de la economía en su conjunto, lo que implica analizar los costos y beneficios que el escenario genera sobre el resto de la sociedad y, entre los primeros, los costos de oportunidad que tiene para la economía el asignar recursos a la alternativa tecnológica en estudio.

Como todo proyecto de inversión, tanto la valoración económica como la financiera se realizan con la intención de buscar resultados positivos; sin embargo, un análisis tradicional de los proyectos de valorización de residuos con frecuencia arroja resultados negativos debido a que los ingresos (por ejemplo, por la venta de reciclables y energía) no son suficientes para cubrir los costos de inversión y operación. Esto explica la necesidad de que el sector público (central o subnacional) sea el que aporte tales recursos (tradicionalmente, mediante el pago de una tasa o tarifa por tonelada de residuos), puesto que, cuando se considera a toda la población, la generación de beneficios es mayor que los costos que deban afrontarse (enfoque ACB de la sociedad en su conjunto).

3.2. ANÁLISIS MULTICRITERIO

Esta metodología permite incorporar una mirada multidimensional, abordando el problema de la gestión de residuos a partir de la combinación de múltiples variables, tanto cuantitativas como cualitativas, e incluyendo diferentes dimensiones en el análisis, más allá de las que son monetizables. Por ejemplo, la cuantificación monetaria de determinadas variables ambientales -como el potencial de generación de emisiones líquidas y atmosféricas de una determinada tecnología- resulta demasiado compleja y costosa como para incluirla en un análisis costo-beneficio; por otro lado, el análisis multicriterio permite incorporar requerimientos institucionales y normativos para implementar tecnologías que tampoco pueden expresarse en flujos monetarios.

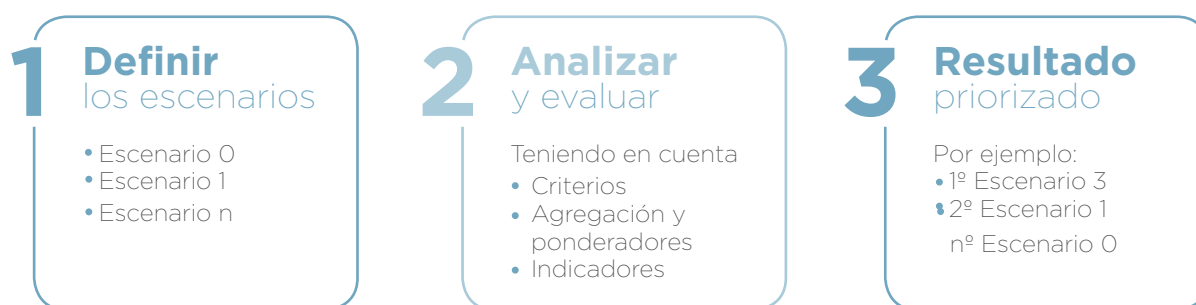
⁷ El VAN y la TIR son dos parámetros utilizados para determinar la rentabilidad de las inversiones mediante la realización de un flujo de fondos que permita definir la viabilidad del proyecto de inversión en estudio. Los términos “VANE” y “TIRE” corresponden a estos mismos parámetros desde el punto de vista de la economía en su conjunto

⁸ Para una mayor descripción, véase el anexo A.



Una de las metodologías de AMC más difundidas y aplicadas a nivel internacional es el proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) (Saaty, 2001). Este esquema se basa en la habilidad humana innata para emitir juicios fundados sobre una sucesión de pequeños problemas, antes que considerar todos los aspectos del problema a la vez, y emplea la comparación por pares como bloque constructivo fundamental para arribar a un juicio global. Para la aplicación de esta metodología se requiere definir un conjunto de componentes de evaluación conformado, entre otros elementos, por: i) criterios, ii) agregación-ponderadores y iii) indicadores, que brindan un resultado que permite comparar la bondad de cada escenario y, con ello, establecer un orden de jerarquía que informe acerca de la conveniencia estratégica de cada uno.

Esquema 1. Pasos para la aplicación de la metodología de AMC



Fuente: Elaboración propia.

Los *criterios* para evaluar los diferentes escenarios deben guardar una estrecha relación con el propósito y los objetivos buscados, y la forma de *agregación* y *ponderación* de dichos criterios permite obtener un resultado sintético para cada escenario. Para evaluar los criterios, primero se deben definir sus *indicadores*, es decir, la unidad de medida para cada uno.

En el caso particular de la toma de decisiones vinculadas a las tecnologías de valorización de residuos, se propone considerar cuatro dimensiones que permitan tener una visión integral: ambiental, económica, operativa y social. Para cada una de estas dimensiones se sugiere una serie de criterios que corresponden a este tipo de tecnologías (cuadro 1).

Cuadro 1. Dimensiones y criterios utilizados en el AMC para las estrategias de valorización de residuos



Dimensiones	Criterios	Descripción del criterio
Ambientales	Recuperación de recursos	Capacidad potencial de recuperar, reutilizar o reciclar materiales, nutrientes, materia orgánica y suelos, así como de obtener beneficios con la regeneración de ecosistemas.
	Generación de emisiones líquidas y atmosféricas	Potencial de generación de emisiones líquidas y atmosféricas, incluidas las provenientes de la disposición de los rechazos.
	Generación de rechazo	Cantidad y calidad de residuos para disponer en terreno luego de la operación.
	Disponibilidad de terrenos	Terrenos disponibles en el departamento, provincia o ciudad, según los requerimientos de área para la instalación de tecnología.
Económicos	Inversión en capital (CAPEX)	Costos de estudios y proyecto, montaje de infraestructuras, equipos y adquisición de terrenos, así como los de cierre.
	Costos de funcionamiento (OPEX)	Inversiones regulares, mantenimiento y mano de obra.
	Ingresos por valorización	Ingresos por ventas de materiales reciclables, energía y compost.
Operativos	Facilidad de gestión del sistema institucional	Requerimientos institucionales, políticos y normativos para la operación del sistema.
	Facilidad de gestión del sistema tecnológico	Habilidades y conocimientos necesarios para la operación del sistema propuesto. Robustez de la tecnología y complejidad de su operación.
Sociales	Generación de empleo	Capacidad de generar empleo de calidad, teniendo en cuenta especialmente la situación de los recuperadores informales de residuos.
	Generación de conciencia ambiental	Aportes en materia de educación y conciencia ambiental en la población.
	Aceptación de la población	Conformidad de la población con el tipo de tecnología empleado.
	Afectación del entorno local	Riesgo de afectar la salud de la población y las actividades productivas locales.

Fuente: Colturato et al. 2019

A la hora de implementar la metodología, algunos de estos criterios aportan de forma positiva y, otros, de forma negativa. Por ejemplo, el criterio “recuperación de recursos” aporta de forma positiva (cuanto mayor es la recuperación, más grande resulta la contribución), mientras que el criterio “generación de rechazo” lo hace negativamente (a mayor valor de rechazo, menor es la valorización positiva del escenario). En el anexo se brinda más información con respecto a los ponderadores, su agregación y los indicadores utilizados.



3.3. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS

Cuando se comparan las dimensiones y variables específicas consideradas en estos dos métodos aparecen algunos aspectos relevantes, que vale la pena señalar. Se trata de los siguientes:

- La **dimensión ambiental** es abarcada por ambos métodos, razón por la cual es necesario evaluar, por ejemplo, la generación de emisiones, el rechazo de residuos, la disponibilidad de terrenos y la recuperación de recursos. En el ACB, sin embargo, la recuperación de recursos está acotada a los materiales reciclables y la venta de energía (biogás, electricidad y combustible derivado de residuos [CDR]), y no incluye una valorización de los nutrientes, como sí sucede en el AMC.
- En la metodología ACB, la **dimensión económica** tiene una mayor precisión y profundidad informativa que en el análisis multicriterio, aunque en términos generales ambos métodos incluyen las principales variables económicas de la gestión de residuos.
- La **dimensión operativa** se refiere principalmente a los componentes estratégicos para la gestión, como los ajustes institucionales, políticos y normativos, así como a los necesarios para robustecer la operación de los sistemas, variables cuya valorización monetaria es muy difícil. Por lo tanto, se encuentra presente en el AMC, pero no en el ACB.
- En el análisis costo-beneficio, la **dimensión social** se expresa en términos monetarios y se refiere a la generación de empleo y afectación del entorno local, mientras que en el AMC se agregan otras dos variables, de corte más cualitativo: la creación de conciencia ambiental y la aceptación de la población de los sistemas propuestos.

En conclusión, un método prioriza siguiendo la eficiencia de asignación de recursos y el otro según la conveniencia estratégica. La variable operativa solo es considerada mediante el AMC. Ambos métodos permiten incluir variables ambientales y sociales, pero el ACB incorpora solo aquellas que puedan valorarse en términos monetarios. En este sentido, ambas metodologías pueden utilizarse de forma complementaria.



MONTEVIDEO: ESTUDIO DE CASO

El objetivo de la consultoría (Colturato et al., 2019) que da origen a esta publicación fue proponer una **estrategia de valorización de residuos domiciliarios y de limpieza pública**,⁹ recomendando una tecnología o combinación de tecnologías adecuada a la ciudad de Montevideo. Por su parte, las metodologías expuestas en el presente trabajo fueron utilizadas para estudiar las alternativas de valorización de residuos domiciliarios y de limpieza pública en Montevideo, un análisis que comenzó con un diagnóstico de las cantidades y los orígenes de los residuos dispuestos en el único relleno sanitario de la ciudad, denominado Felipe Cardoso. Luego se definieron los distintos escenarios posibles (es decir, la combinación de alternativas tecnológicas) y se aplicaron las metodologías de evaluación planteadas. El resultado del estudio arrojó un orden de prioridad entre los escenarios evaluados que sirve de base para la toma de decisiones.

⁹ De acuerdo con la Ley Orgánica Municipal (1935), el gobierno departamental tiene la competencia de la prestación de servicios para los residuos domiciliarios y de limpieza pública, no así para otras corrientes de residuos.



4.1. DIAGNÓSTICO DE INGRESOS PARA DISPOSICIÓN FINAL

La disposición final en el relleno sanitario Felipe Cardoso se inició en la década de los noventa, pues originalmente se trató de un basural que, con el paso de los años, y a medida que fue creciendo y siendo objeto de medidas estructurales concretas, se convirtió en relleno sanitario. Este relleno cuenta con la infraestructura necesaria para su correcta operación, ya que dispone de control de ingreso, balanza y software de registro, cerco perimetral, paquete de impermeabilización inferior y cobertura final para las celdas cerradas, sistema de recolección y tratamiento de lixiviado y gases, así como de la maquinaria requerida para el tendido y compactación de los residuos. Además, está prohibido el ingreso de personas externas a la operación del relleno.

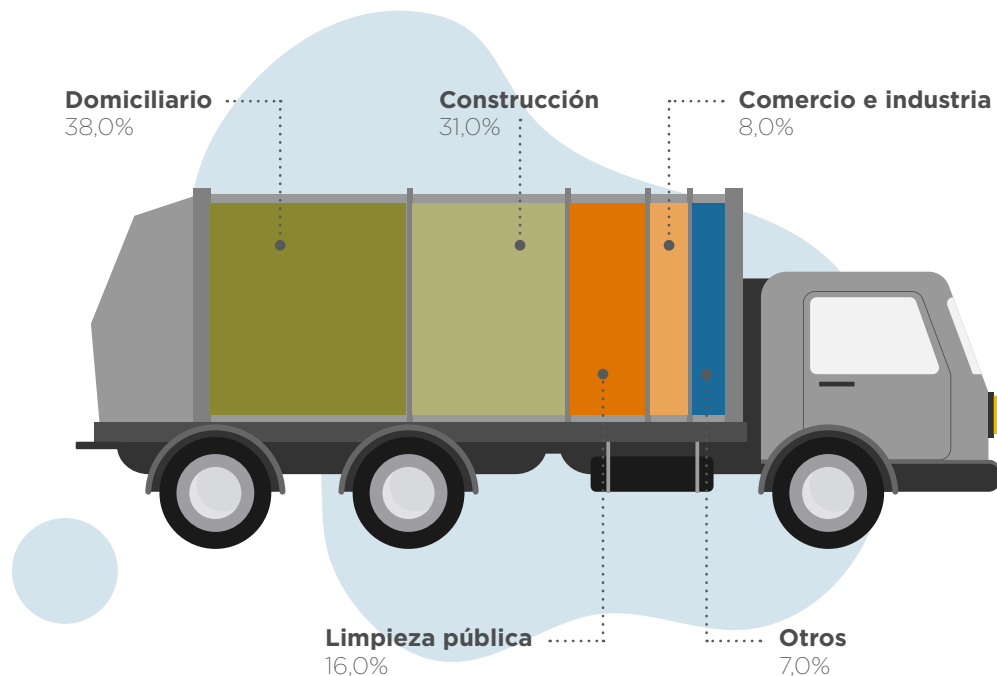
En la última década, la ciudad ha enfrentado el desafío de la falta de espacio para la disposición final de residuos y los estudios realizados indican que, dentro del territorio de Montevideo, existen importantes limitantes de la disponibilidad de terrenos para instalar otro relleno sanitario. Si bien se han realizado diversos esfuerzos para disponer estos residuos fuera de los límites de Montevideo, por distintos motivos (políticos, rechazo de la población) no han arribado a buen puerto. Por ese motivo, la optimización y prolongación de la vida útil del relleno Felipe Cardoso, actualmente en uso, se vuelve un asunto perentorio. De acuerdo con los últimos proyectos de ampliación del relleno, el remanente de la vida útil del sitio es de entre 8 y 10 años,¹⁰ un rango que podría incrementarse si se desvía el ingreso de residuos de otros orígenes (como los residuos de la construcción, entre otros) y se implementan alternativas de valorización de residuos sólidos domiciliarios y de limpieza pública.

En 2018, ingresaron al relleno 895.000 toneladas de residuos, cuyos orígenes fueron definidos a través del procesamiento de los registros de ingreso. Los resultados obtenidos se resumen en el gráfico 1, donde se destaca que, del total de residuos sólidos, el 38% proviene de domicilios, el 16% de la limpieza pública y el 46% restante de actividades comerciales, industriales o de servicios (Colturato et al., 2019).

¹⁰ Estimada de acuerdo al proyecto de ampliación suministrado por la Intendencia de Montevideo (IDM).



Gráfico 1. Distintos orígenes de los residuos que ingresan al relleno sanitario Felipe Cardoso, 2018 (en porcentaje)



Fuente: Colturato et al. (2019).

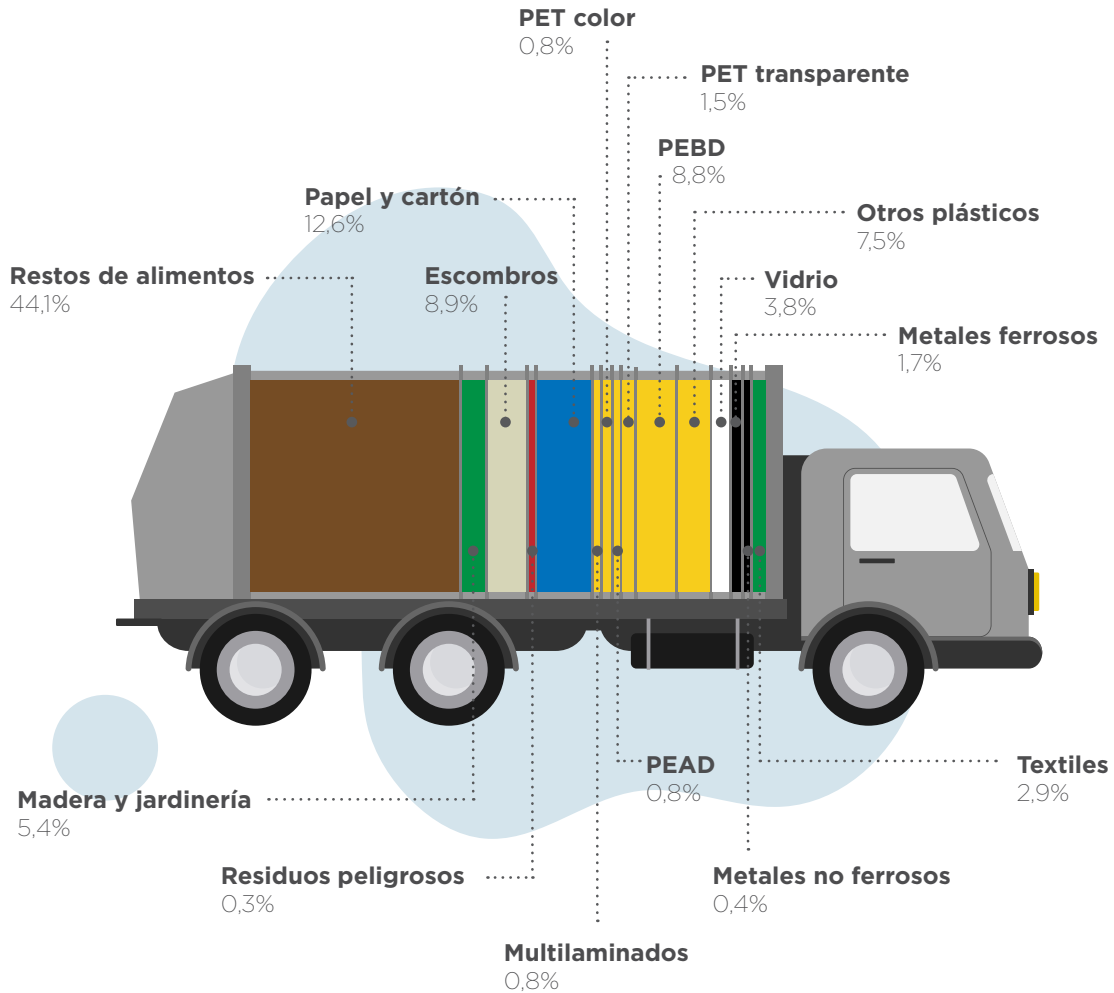
Considerando que en Montevideo habitan 1,32 millones de personas (INE, 2011) y que en 2018 ingresaron al relleno Felipe Cardoso aproximadamente 1.300 toneladas diarias de residuos de origen domiciliario y de limpieza pública, la tasa de disposición en relleno sanitario resultante es de 0,70 kg/persona-día y 0,29 kg/persona-día, respectivamente.

El gráfico 2 presenta la composición física, por peso, de los residuos de origen domiciliario dispuestos en el relleno Felipe Cardoso para 2015 (LKSUR, 2015). Como puede advertirse, la fracción que predomina es la materia orgánica (*compostables*), representando un 46% (restos de alimentos, madera y jardinería), seguida por la fracción potencialmente *reciclable*, con un 38%, y por la fracción *mezclados*,¹¹ que representa el 16% de la composición. Esta última fracción es la que inevitablemente debe ser dispuesta en rellenos sanitarios, mientras que las otras dos permiten otras alternativas de gestión. Con base en la composición anterior, las distintas fracciones fueron agrupadas con el propósito de determinar su potencial destino (gráfico 3).

¹¹ En la fracción mezclados predominan los escombros, los pañales y los apósitos, así como otros materiales domiciliarios con características de peligrosidad, en fracciones menores, como pilas y baterías.



Gráfico 2. Composición de residuos de origen domiciliario dispuestos en el relleno sanitario Felipe Cardoso, por peso, 2015 (en porcentaje)



Fuente: Elaboración propia, con base en LKSur (2015).

Nota: Debido a que Uruguay cuenta con una norma técnica para la identificación de cada residuo, en los gráficos expuestos se intentó respetar el código de colores y la nomenclatura definidos por dicha norma (Norma de identificación y clasificación de residuos, UNIT 1239: 2017).

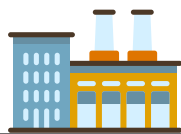
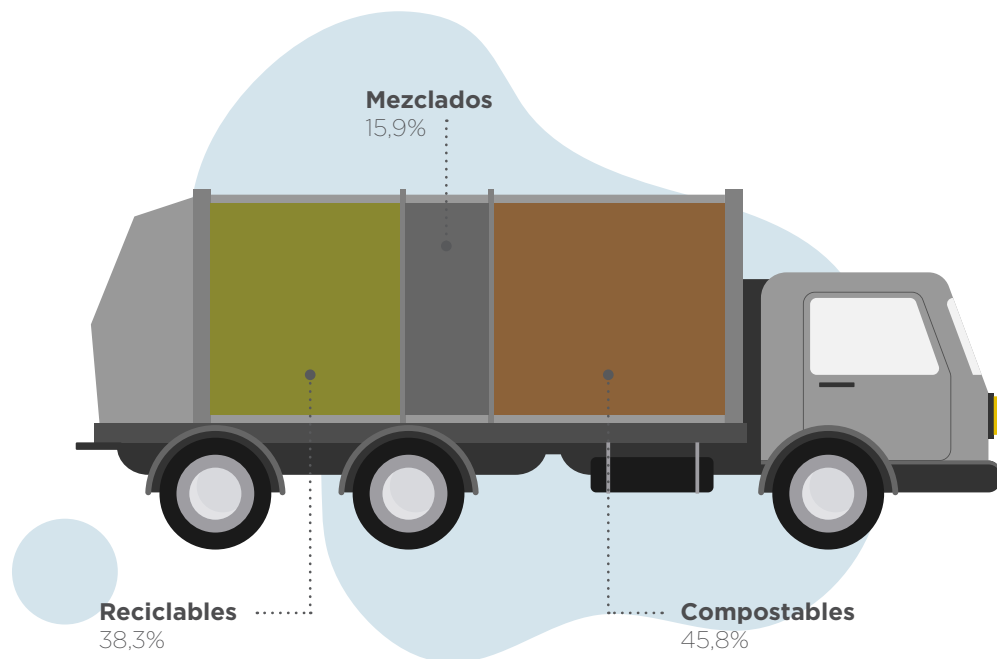


Gráfico 3. Composición de residuos de origen domiciliario dispuestos en el relleno sanitario Felipe Cardoso, por peso, en función del potencial destino de los materiales, 2015 (en porcentaje)



Fuente: Colturato et al. (2019).

En el 2004 se aprobó en Uruguay la Ley de reciclaje de envases,¹² basada en el principio de responsabilidad extendida del productor (REP). En este marco, en 2014 se implementó en la ciudad de Montevideo una acción para separar dos fracciones (reciclables y residuos mezclados) en origen. La escasa adhesión de la población, junto a las deficiencias que presentan muchos de los sistemas de recolección selectiva y valorización de residuos, coadyuvaron para que gran parte de los residuos generados en los hogares no pudiese reciclarse, debiendo ser dispuestos en el relleno sanitario. Según datos del Plan de Gestión de Envases,¹³ en 2019 se recuperó menos de un 3% de los reciclables que ingresaron al mercado.

Con respecto a la fracción orgánica de los residuos domiciliarios, la ciudad no cuenta con un sistema de recolección selectiva. Y si bien existen algunas iniciativas de compostaje comunitario –como la promoción, aún incipiente, del compostaje en el hogar por parte de la Intendencia de Montevideo–, actualmente la mayor parte de dicha fracción es dispuesta en el relleno sanitario.

¹² Véase el enlace <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/17849-2004>.

¹³ Para más información, véase la página web: www.ciu.com.uy.



4.2. ESCENARIOS ESTUDIADOS

Para dimensionar las tecnologías de gestión de residuos sólidos domiciliarios y de limpieza pública se tomaron en cuenta dos variables: la variación de la población y la tasa de generación de residuos. Con respecto a esta última, para el caso de Montevideo se proyectó que la generación actual de residuos se mantendría constante, a partir de asumir que se adoptarán estrategias de minimización de residuos para contrarrestar su crecimiento¹⁴ y que la población de la ciudad tiene una tasa de crecimiento muy baja.¹⁵

Con el propósito de determinar y describir las tecnologías adecuadas para la definición de escenarios, se utilizó como punto de partida el estudio de Magdalena Correal (de próxima publicación), que se encuentra basado en los documentos BREF (*EU Best Available Techniques reference documents*),¹⁶ preparados por la Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación¹⁷ para diferentes sectores industriales.

En concreto, para el sector de gestión de residuos, existen dos documentos BREF: el BREF *Waste Incineration* (2018), que incluye las mejores técnicas para el tratamiento térmico de residuos, y el BREF *Waste Treatment*, que refiere a las mejores técnicas para el tratamiento no térmico de residuos sólidos. El primero considera técnicas de incineración, pirólisis y gasificación, mientras que el segundo aborda técnicas de tipo biológico y mecánico. Teniendo en cuenta lo relevado en estos dos informes, las tecnologías existentes pueden agruparse de la siguiente forma:

- **Tratamientos mecánicos (plantas de clasificación y plantas de recuperación de materiales).**
- **Tratamientos biológicos (digestión anaerobia y compostaje).**
- **Tratamientos térmicos (incineración, pirólisis y gasificación).¹⁸**

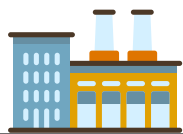
¹⁴ Se estima que la tasa de crecimiento de la generación de residuos domiciliarios rondará un 6,9% para el periodo 2020-25, según las estimaciones de Themelis y Díaz Barriga (2012).

¹⁵ Esta baja tasa de crecimiento poblacional se desprende del estudio demográfico realizado por la Oficina de Planeamiento y Presupuesto (OPP) en el marco del proceso de elaboración de la Estrategia Nacional de Desarrollo Uruguay 2050, en el que se analizan distintos escenarios de inmigración y emigración (INE, 2020).

¹⁶ De acuerdo con estos documentos, las mejores técnicas disponibles (BAT, por sus siglas en inglés) son consideradas "...la fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para construir, en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea posible, reducir en general las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente".

¹⁷ European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau.

¹⁸ Los tratamientos de pirólisis y gasificación no fueron contemplados, ya que no se consideran tecnologías con un nivel de maduración avanzado en su aplicación para residuos sólidos urbanos. Existen muy pocos antecedentes con este tipo de recursos (residuos sólidos urbanos) y aún no han alcanzado el suficiente tiempo de operación.



Con base en las mejores tecnologías disponibles, y su nivel de implementación a nivel global (fase comercial y cantidad de plantas operando con residuos sólidos urbanos), se definieron seis escenarios posibles, además del escenario 0, que representa la continuidad del sistema actual (disposición en relleno sanitario).

Habida cuenta de la prioridad que tiene la valorización de recursos en la gestión, y considerando la normativa nacional y la importancia de incluir laboralmente a los y las recuperadores/as informales, se definió priorizar el reciclaje frente a otras alternativas, razón por la cual se decidió incorporar una planta de recuperación de materiales en todos los escenarios planteados. Los productos valorizables que pueden obtenerse en tales escenarios son: i) materiales reciclables, ii) enmiendas orgánicas y iii) energía (eléctrica, biometano y combustibles o biocombustibles derivados de residuos [CDR o bioCDR]).¹⁹

Las plantas de tratamiento mecánico biológico (TMB), que permiten recuperar materiales reciclables –y utilizarlos, por ejemplo, como combustible alternativo–, así como materia orgánica y nutrientes, presentan mayores niveles de eficiencia y calidad de sus productos finales en la medida en que los residuos que ingresan hayan sido objeto de una mayor segregación en origen (Confalonieri et al., 2016). Si bien las plantas de TMB de los distintos escenarios comenzarán a funcionar con la mayoría de los residuos mezclados, a medida que se incremente la separación en origen domiciliaria, se consolidarán como una alternativa para incorporar gradualmente líneas específicas de recuperación de materiales separados en origen, de forma de obtener mejores productos y, por lo tanto, mejores ingresos. Teniendo en cuenta estas consideraciones, a continuación se presentan los seis escenarios que combinan las distintas tecnologías presentadas (el orden de presentación no implica priorización alguna).²⁰

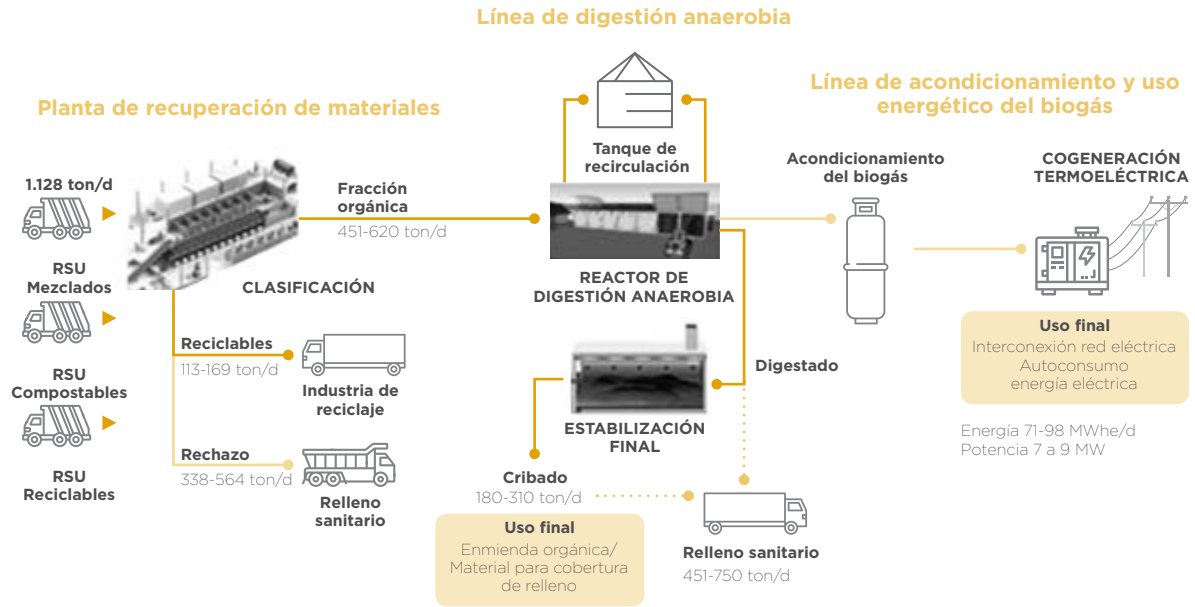
El **escenario 1** propone recuperar en primera instancia, a través de una planta de recuperación de materiales (PRM), los reciclables (plásticos, metales, cartones y papeles) y orgánicos finos, derivando estos últimos hacia una instalación de digestión anaerobia, y los materiales de alto poder calorífico, que no están en condiciones de ser reciclados (muy sucios o muy pequeños), acondicionados como un CDR. El biogás recuperado en la unidad biológica anaerobia puede utilizarse para generar energía eléctrica de forma constante durante el día (escenario 1A, gráfico 4) o ser almacenado para que, en los momentos de mayor demanda, pueda introducirse al sistema eléctrico nacional (escenario 1B, gráfico 5).

¹⁹ Tanto el CDR como el bioCDR, ambos considerados combustibles alternativos, son utilizados como sustitutos de otros, como el coque de petróleo en las plantas cementeras o el fueloil en las plantas industriales. El bioCDR, por estar compuesto principalmente de materia orgánica, se considera carbono neutral, siendo un aspecto relevante en el marco de los acuerdos de cambio climático y los compromisos de reducción de emisiones.

²⁰ Cada escenario fue modelado con 1.128 ton/día. Este valor fue estimado a partir de los datos ingresados al relleno sanitario Felipe Cardoso considerando la siguiente composición: 100% de los residuos generados en los hogares (identificados en función de los camiones de recolección domiciliaria) y 50% de los residuos que se generan en la limpieza pública (se estima que el 50% restante proviene de otros orígenes, como, por caso, del sector comercio).



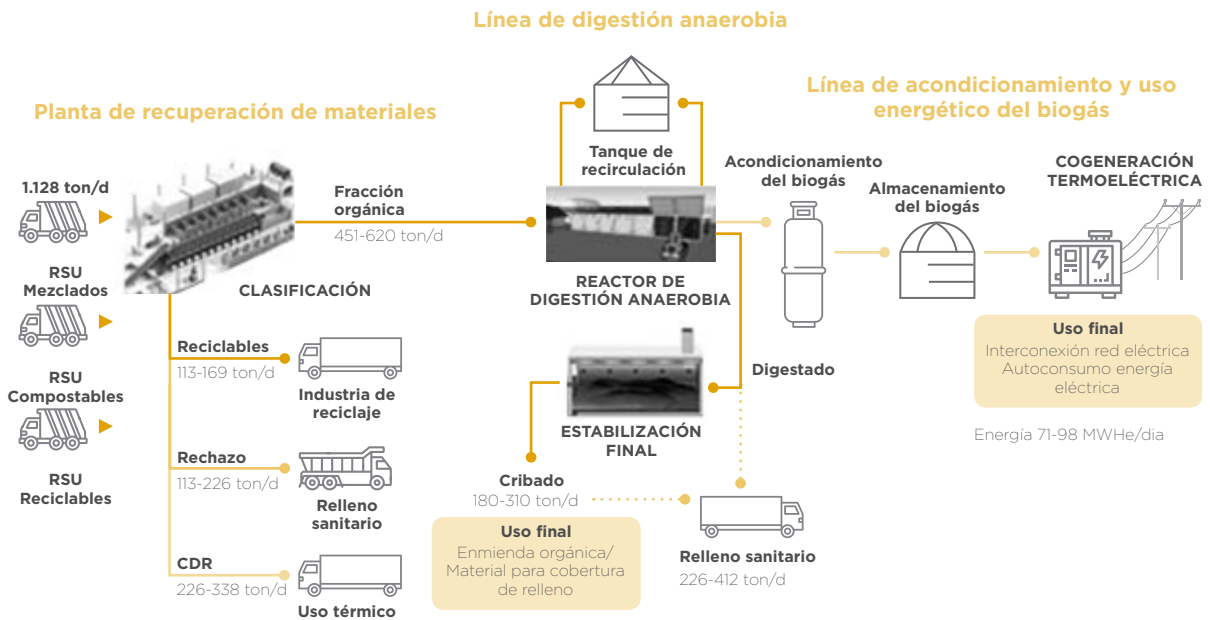
Gráfico 4. Escenario 1A: Biogás a energía eléctrica sin CDR



Fuente: Colturato et al. (2019).

Línea de estabilización aerobia

Gráfico 5. Escenario 1B: Biogás acumulado para energía eléctrica gestionable con CDR



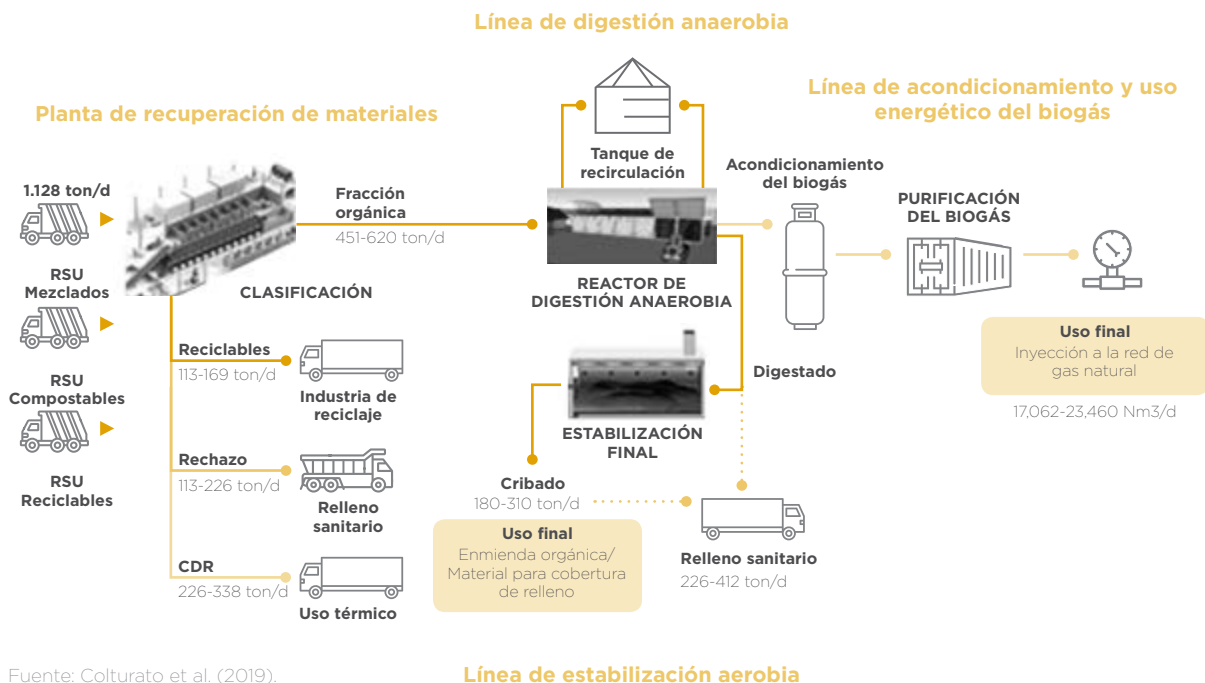
Fuente: Colturato et al. (2019).

Línea de estabilización aerobia



El **escenario 2** (gráfico 6) es igual al escenario 1, pero en lugar de convertir el biogás en energía eléctrica, se lo purifica para llevarlo a biometano (filtrando los gases no deseados y concentrando el metano), como una alternativa al uso del gas natural.

Gráfico 6. Escenario 2: Biogás a biometano inyectado en la red con CDR

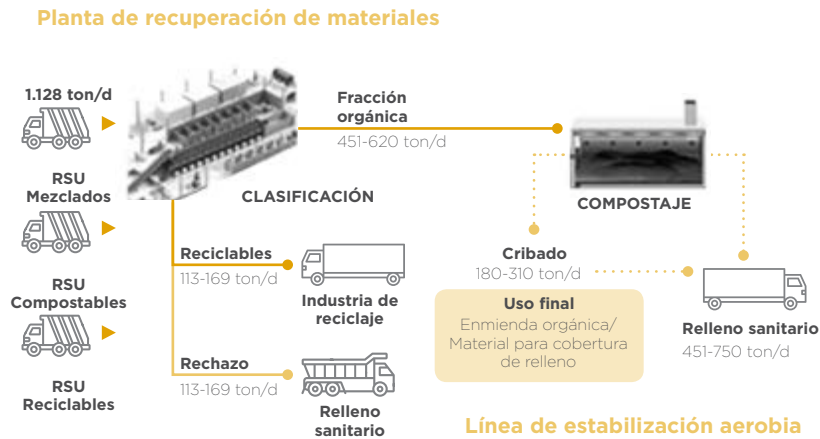


Fuente: Colturato et al. (2019).

El **escenario 3** propone una PRM: en el 3A (gráfico 7), la planta se utiliza únicamente para recuperar reciclables y en el 3B (gráfico 8) se adiciona la recuperación de CDR. Además, en ambos escenarios se plantea el tratamiento biológico con una unidad de estabilización aerobia (compostaje).

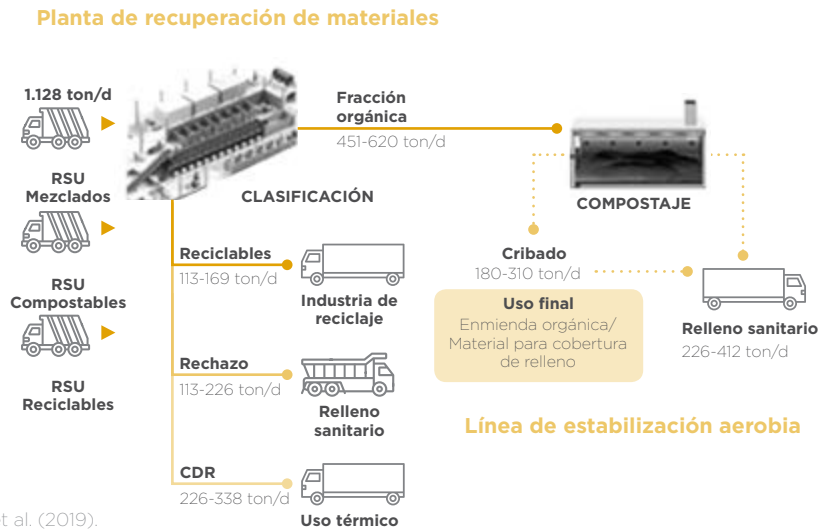


Gráfico 7. Escenario 3A: Compostaje sin CDR



Fuente: Colturato et al. (2019).

Gráfico 8. Escenario 3B: Compostaje con CDR

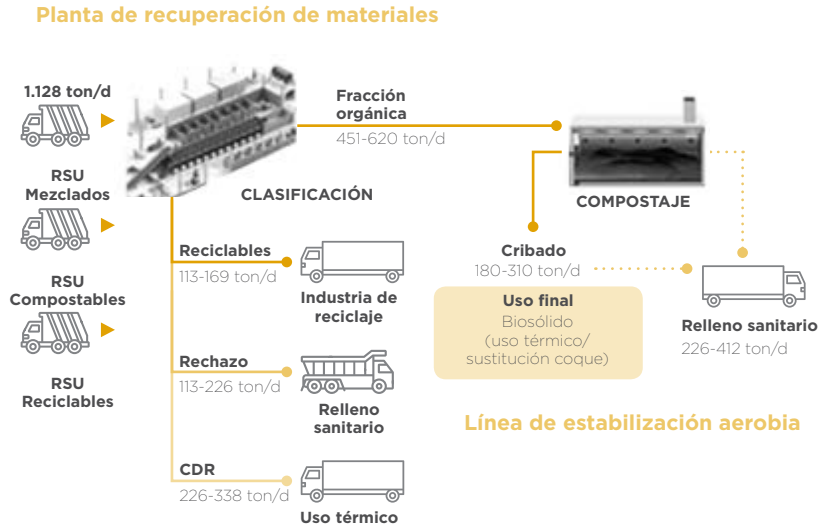


Fuente: Colturato et al. (2019).

El **escenario 4** (gráfico 9) dispone de una PRM con recuperación de reciclables y de CDR, donde la fracción “finos” -que proviene de la planta-, en vez de ser tratada biológicamente, se somete a un proceso de secado para ser utilizada como cobertura de relleno sanitario o como combustible (BioCDR).



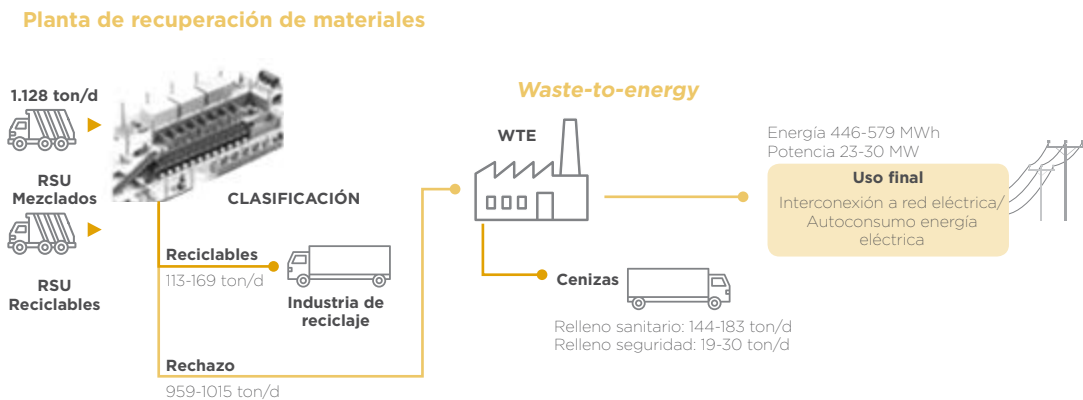
Gráfico 9. Escenario 4: Biosólidos con CDR



Fuente: Colturato et al. (2019).

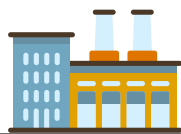
El **escenario 5** (gráfico 10) propone una recuperación de los reciclables mediante una PRM un poco más sencilla, para luego procesar el resto de los materiales en una planta *waste-to-energy* (WTE, incineradora)²¹, con base en tecnologías de parrilla. La energía generada por la WTE puede ser eléctrica y térmica, pero de generación firme (no es posible realizar variaciones significativas en la generación a lo largo del tiempo).

Gráfico 10. Escenario 5: *Waste-to-energy*



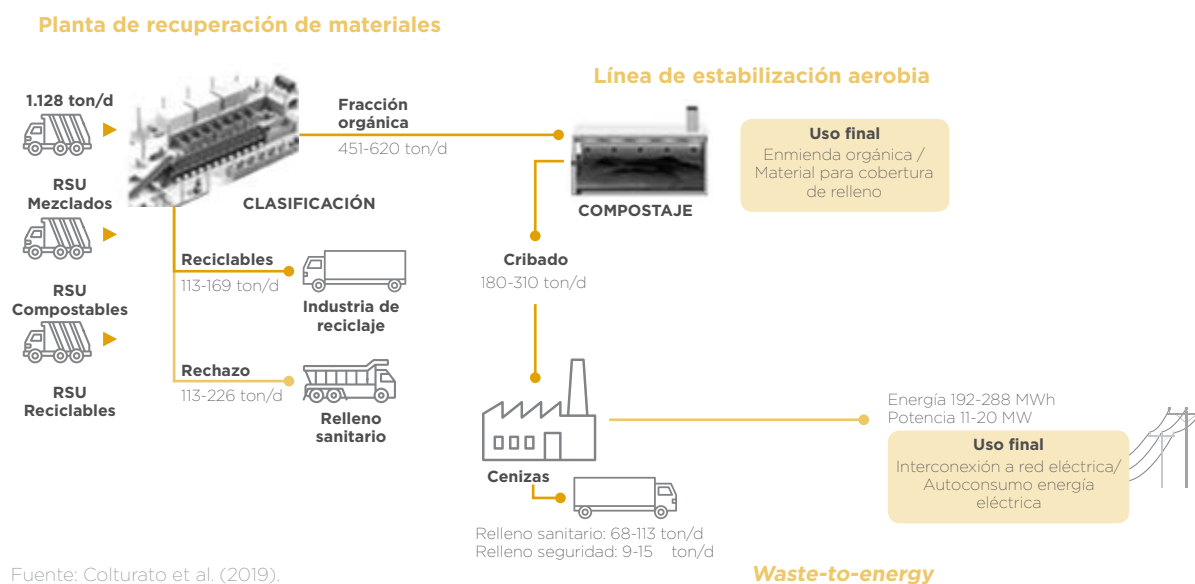
Fuente: Colturato et al. (2019).

²¹ Este análisis no considera la creación de nuevos mercados-negocios energéticos sino solo el existente.



Finalmente, **el escenario 6** (gráfico 11) presenta una combinación de los escenarios anteriores, a partir de la instalación de tres unidades: i) una PRM que recupere reciclables (no CDR), ii) una unidad biológica basada en una estabilización aerobia (por su sencillez operativa y los costos de inversión), y iii) una WTE de menor porte, que absorba los rechazos de las dos primeras para generar energía eléctrica y térmica.

Gráfico 11. Escenario 6: Compostaje + waste-to-energy



En el análisis de alternativas posibles de valorización,²² cabe considerar que, en los últimos 10 años, la matriz energética uruguaya ha sufrido una importante transformación debido a una fuerte penetración de las energías renovables en la generación de energía eléctrica (98% renovable en 2019) (MIEM, 2020). Desde la perspectiva de la valorización de residuos, esto plantea un desafío, ya que, en la situación actual, la energía derivada competiría en un mercado saturado, con precios todavía menores que los que generalmente se obtienen para energía con base en residuos (Colturato et al., 2019).

²² Respecto de la posibilidad de buscar una solución metropolitana existen dos alternativas: i) transportar los residuos de Montevideo a otro sitio fuera de la ciudad o ii) incorporar a la solución de valorización de Montevideo residuos provenientes de otras ciudades. Para la primera opción, se calcularon las distancias a las que se podrían transportar los residuos hasta un relleno sanitario fuera de Montevideo, al mismo costo global que la alternativa de valorización planteada. El dato obtenido resulta un insumo clave para la toma de decisiones, teniendo en cuenta la necesidad de acuerdos entre gobiernos locales y la aceptación social de los vecinos de la zona de implementación. La segunda opción se consideró poco factible, ya que generaría un aumento importante de las cantidades de residuos para disponer en el relleno sanitario Felipe Cardoso.



El cuadro 2 resume, según cada escenario, los productos para valorización derivados de las distintas tecnologías planteadas.

Cuadro 2. Productos para valorización de residuos, según cada escenario

	Escenario							
	E1A	E1B	E2	E3A	E3B	E4	E5	E6
	Biogás a EE sin CDR	Biogás acumulado para EE gestionable con CDR	Biogás a biometano inyectado a la red con CDR	Compostaje sin CDR	Compostaje con CDR	Biosólidos con CDR	Waste-to-energy	Compostaje + WTE
Materiales reciclables								
Combustible derivado de residuos (CDR)								
BioCDR (fracción fina)								
Biogás de digestión anaerobia	Producción EE constante	Producción EE a demanda	Biometano					
Enmienda orgánica								
WTE EE generación firme								

Fuente: Elaboración propia.

WTE: Waste-to-energy; EE: Energía eléctrica.



4.3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de aplicar las metodologías propuestas para los escenarios seleccionados de Montevideo.

Análisis costo-beneficio

En el cuadro 3 se observan los resultados de la aplicación de la metodología ACB. Como se indicó en la descripción de dicha modalidad, los resultados toman en cuenta valores incrementales frente al escenario 0.

Cuadro 3. Resultados de la aplicación del análisis costo-beneficio

Indicador	Escenario							
	E1A	E1B	E2	E3A	E3B	E4	E5	E6
	Biogás a EE sin CDR	Biogás acumulado para EE gestionable con CDR	Biogás a biometano inyectado a la red con CDR	Compostaje sin CDR	Compostaje con CDR	Biosólidos con CDR	Waste-to-energy	Compostaje + WTE
VAN ^a	-79,7	-104,2	-72,0	-46,4	-42,3	-53,6	-354,3	-249,4
TIR	-12,1%	-15,7%	-11,7%	-6,9%	-7,3%	-15,8%	-12,0%	-10,9%
VANE ^{a b}	19,1	6,8	43,9	60,6	78,7	76,5	-353,9	-212,9
TIRE ^b	11,2%	8,6%	16,3%	24,3%	30,6%	31,9%	-14,2%	-8,5%

Fuente: Colturato et al. (2019).

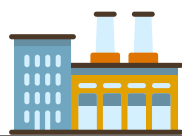
^a Valores expresados en millones de dólares constantes según el tipo de cambio de agosto de 2019.

^b VANE y TIRE refieren a considerar el enfoque socioeconómico o de la economía en su conjunto.

WTE: Waste-to-energy; EE: Energía eléctrica; VAL: Valor actual neto; VALE: Valor actual neto económico; TIR: Tasa interna de retorno; TIRE: Tasa interna de retorno económico.

Para calcular la inversión en capital (CAPEX) y los costos de funcionamiento (OPEX) de las distintas tecnologías se tomaron en cuenta los valores locales y las ofertas técnico-económicas para proyectos similares en la región. Un primer resultado significativo del ACB fue que **ninguno de los escenarios estudiados resulta viable bajo el enfoque financiero.**²³ Esto se observa en los siguientes indicadores:

²³ Este análisis incluye únicamente ingresos por venta de materiales y/o energía y su resultado negativo demuestra la necesidad de un "gate fee".



- **El VAN de todos los escenarios es negativo**, con una alta variabilidad, que va de US\$46 millones a US\$350 millones, según el escenario. Tal resultado indica que los fondos generados con el conjunto de soluciones planteadas para cada escenario no alcanzan a recuperar la inversión requerida.
- **La TIR de todos los escenarios es inferior a la tasa considerada como costo de oportunidad** (7,5%), e incluso es negativa. Así, se concluye que invertir en dichos escenarios no es conveniente, ya que la inversión generaría una rentabilidad negativa.

Por otra parte, **la evaluación realizada desde el punto de la economía en su conjunto arroja un resultado diferente, indicando que es conveniente invertir en seis de los ocho escenarios analizados**, porque cada uno de ellos genera un flujo de beneficios netos que supera el valor de las inversiones iniciales. Las dos excepciones las constituyen **los escenarios E5 (waste-to-energy) y E6 (compostaje + WTE), los que no resultan inversiones viables para el caso en estudio**. Los indicadores que sustentan lo anterior son los siguientes:

- **El VANE es positivo en seis de los ocho escenarios estudiados**, con guarismos de entre US\$7 millones y US\$79 millones –expresados en precios de eficiencia–, y **negativo en los escenarios E5 y E6**. En el primer caso, invertir en las tecnologías de valorización y disposición final estudiadas genera un flujo de fondos que compensa las inversiones requeridas.
- **La TIRE de seis de los ocho escenarios estudiados es superior al costo de oportunidad** (7,5%), ubicándose entre el 9% y el 32% según cada escenario, indicando la rentabilidad social de invertir en estas tecnologías. En cambio, la TIRE es negativa en los escenarios E5 y E6, por lo que ninguno de ellos resulta rentable para la sociedad en su conjunto.

La comparación entre ambos enfoques da cuenta de resultados dispares, lo cual muestra que los escenarios no resultan viables bajo la óptica financiera, pero sí bajo la mirada socioeconómica. En otras palabras, **desde una óptica privada no resulta financieramente rentable invertir en proyectos con las tecnologías estudiadas. Sin embargo, si se considera que estas alternativas generan un conjunto de beneficios para la sociedad (económicos, ambientales y sociales), más allá del agente que las gestione, sí se encuentra justificado invertir en la mayoría de ellas**, ya que el flujo de beneficios netos que generan –para la sociedad en su conjunto– supera el valor de las inversiones requeridas. Además, la comparación entre los escenarios estudiados indica que:

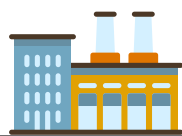


- Los escenarios E3B (compostaje con CDR) y E4 (biosólidos con CDR) son los de mayor rentabilidad social, generando un mayor VANE (algo más de US\$75 millones) y una TIRE más alta (el 31% y el 32%, respectivamente).
- A los anteriores, les siguen los escenarios E3A (compostaje sin CDR) y E2 (biogás a biometano inyectado a la red con CDR), con tasas significativas de rentabilidad social (el 24% y el 16%, respectivamente).
- Los escenarios E1A (biogás a EE sin CDR) y E1B (biogás acumulado para EE gestionable con CDR) son viables socioeconómicamente, pero exhiben una menor rentabilidad social (el 11% y el 9%, respectivamente).
- En los escenarios E5 (*waste-to-energy*) y E6 (compostaje + WTE) no resulta conveniente invertir recursos.

Análisis multicriterio

La metodología de AMC aplicada para evaluar las tecnologías de valorización de residuos arribó a la ponderación que se presenta en el cuadro 4. Para su construcción, se consultó a un grupo de especialistas en gestión de residuos, nacionales e internacionales.²⁴ Los resultados obtenidos indican la mayor importancia relativa de la dimensión ambiental (40%), seguida de la económica (24%) y la social (22%), ubicando en cuarto lugar a los aspectos de gestión operativa (15%). Este resultado global muestra una diferencia significativa entre la opinión de los especialistas extranjeros y la de los especialistas nacionales, puesto que para los primeros la dimensión económica es más relevante (ponderación cercana al 40%), mientras que para los especialistas nacionales se trata de una de las dimensiones de menor importancia (alrededor del 15%). Se observa entonces que la opinión extranjera pone un mayor énfasis en los aspectos económicos, seguidos de los ambientales, mientras que la opinión nacional sitúa el tema ambiental en un lugar destacado (casi el 50% del peso total).

²⁴ El listado de participantes se puede visualizar en Colturato et al. (2019).



Cuadro 4. Ponderación empleada para la evaluación de AMC aplicada a la valorización de residuos

Dimensiones / ponderación		Criterios / ponderación		Ponderación global
Ambiental	40%	Recuperación de recursos	42%	16,6%
		Generación de emisiones ^a	25%	10,0%
		Generación de rechazo	16%	6,4%
		Disponibilidad de terrenos	17%	6,5%
Económica	24%	Inversión en capital (CAPEX)	37%	8,9%
		Costos de funcionamiento (OPEX)	48%	11,4%
		Ingresos por valorización	15%	3,5%
Operativa	15%	Facilidad de gestión institucional	61%	8,8%
		Facilidad de gestión tecnológica	39%	5,7%
Social	22%	Generación de empleo	12%	2,7%
		Generación de conciencia ambiental	27%	6,0%
		Aceptación de la población	25%	5,5%
		Afectación del entorno local	36%	7,9%

Fuente: Colturato et al. (2019).

^a Refiere a emisiones a la atmósfera y líquidas.

En el cuadro 5 se presentan los resultados de aplicar el análisis multicriterio a cada escenario, con la contribución por dimensión presentada en el cuadro 4.



Cuadro 5. Resultados del AMC para cada escenario, según dimensión

Dimensiones	Escenario									Máximo
	E0	E1A	E1B	E2	E3A	E3B	E4	E5	E6	
	Situación actual	Biogás a EE sin CDR	Biogás acumulado para EE gestionable con CDR	Biogás a biometano inyectado a la red con CDR	Compostaje sin CDR	Compostaje con CDR	Biosólidos con CDR	Waste-to-energy	Compostaje + WTE	
Ambiental	0,2%	24,0%	34,0%	34,0%	24,0%	34,0%	24,0%	18,0%	29,0%	39,0%
Económica	20,0%	15,0%	13,0%	15,0%	16,0%	16,0%	16,0%	3,0%	8,0%	24,0%
Operativa	15,0%	6,0%	3,0%	3,0%	9,0%	4,0%	0,6%	6,0%	3,0%	15,0%
Social	1,0%	22,0%	14,0%	19,0%	17,0%	14,0%	10,0%	6,0%	9,0%	22,0%
Global	36,2%	67,0%	64,0%	71,0%	66,0%	68,0%	50,6%	33,0%	49,0%	100,0%

Fuente: Colturato et al. (2019).

Los resultados muestran tres grupos de escenarios:

1. El primero corresponde a los que presentan una contribución con la valorización y disposición de residuos estimada entre el 64% y el 71%, siendo el E2 el que exhibe la mayor prioridad, seguido del E3B, el E1A, el E3A y el E1B, con niveles de contribución del 68,0%, el 67,0%, el 66,0% y el 64%, respectivamente.
2. El segundo, compuesto por los escenarios E4 y E6, presenta un aporte del 50%.
3. El tercer grupo corresponde a los que registraron la menor prioridad, y está conformado por los escenarios E0 (escenario base) y E5, con una contribución estimada del 36% y el 34%, respectivamente.

Comparación de resultados

Finalmente, en el cuadro 6 se presenta la comparación de resultados obtenidos en ambos métodos.



Cuadro 6. Comparación de resultados obtenidos por AMC y ACB

	Descripción	Posición AMC	Posición ACB	Comentario
E2	Biogás a biometano inyectado a la red con CDR	1º	4º	Alta inversión en purificación de gas e inyección.
E3B	Compostaje con CDR	2º	2º	CAPEX relativamente bajo. Alto desvío de material al relleno.
E1A	Biogás a energía eléctrica sin CDR	3º	5º	Alta inversión. Valores bajos para la comercialización de energía.
E3A	Compostaje sin CDR	4º	3º	CAPEX relativamente bajo.
E1B	Biogás acumulado para energía eléctrica gestionable con CDR	5º	6º	Mal ponderado en ambos métodos. Alto CAPEX para el almacenamiento de biogás y bajos valores para comercialización.
E4	Biosólidos con CDR	6º	1º	Mal ponderado por análisis multicriterio por no recuperar recursos.
E6	Compostaje + WTE	7º	8º	Mal ponderado en ambos métodos. CAPEX y OPEX altos. Bajos precios para comercialización de energía.
E0	Relleno sanitario con captura de biogás y quema	8º	7º	Mal ponderado en ambos métodos. Última ruta en la jerarquía de residuos.
E5	Waste-to-energy	9º	9º	Mal ponderado en ambos métodos. CAPEX y OPEX altos. En la jerarquía de residuos, solo es mejor que el relleno sanitario.

Fuente: Colturato et al. (2019).

Se observa que, con ambas metodologías, **los escenarios E5 y E6 (WTE y Compost + WTE) se sitúan en las últimas posiciones**, lo que principalmente obedece a los altos costos de inversión y operación y a los aspectos ambientales, como el no aprovechamiento de recursos (orgánicos y nutrientes) y la generación de emisiones. En el contexto de la actual matriz de energía eléctrica nacional, que dispone de una generación de energía renovable superior al 90%, la sustitución energética incide de forma muy marginal en la reducción de las emisiones y estas aumentan por la quema de residuos de origen fósil, como los plásticos. Asimismo, al aprovechar el poder calorífico de los residuos, el E5 no recupera otros recursos provenientes de la fracción orgánica (materia orgánica y otros nutrientes).



Según la opinión de los distintos expertos consultados, en el AMC los aspectos ambientales y, en particular, los referidos al potencial de recuperación de recursos (orgánicos y nutrientes), fueron considerados como los de mayor relevancia, lo que se ve reflejado en la posición resultante de los escenarios E5 y E6. Además, vale la pena resaltar que, en términos generales, las posiciones en que se ubicó cada método no exhiben mayores diferencias, existiendo dos escenarios que quedaron en la misma posición y cuatro con una diferencia de tan solo una posición.

Dos escenarios (E2 y E4) presentan una diferencia de priorización entre una metodología y otra: el E4 es el prioritario según el análisis costo-beneficio y ocupa el 6º lugar para el AMC, mientras que el E2 es el prioritario para el análisis multicriterio y el 4º en prioridad para el ACB. Este resultado es esperable si se tiene en cuenta que el escenario E2 (biogás usado como biometano) requiere elevadas inversiones, lo que afecta el resultado de la metodología ACB, pero constituye la mejor opción para el AMC, puesto que se recuperan recursos y se desplaza un combustible de origen fósil por el gas natural y el coque utilizado en las cementeras. Precisamente la situación inversa se advierte en el escenario E4 (bioCDR), que en el AMC obtiene un resultado menor porque los recursos no son recuperados, sino utilizados para generar energía, si bien las inversiones y costos operativos son bajos, obteniéndose ingresos importantes por la venta de materiales.

En la modalidad de análisis multicriterio, cinco escenarios presentan resultados muy similares (entre el 67% y el 71%). Por lo tanto, parecería razonable que entre estos escenarios (E1A, E1B, E2, E3A y E3B), el valor de las TIRE del ACB, como indicador de la mejor asignación de recursos para la sociedad, desempeñe un papel preponderante.

4.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL CASO DE MONTEVIDEO

A partir de los resultados obtenidos por los análisis ACB y AMC **se desprende que las soluciones vinculadas con la implementación de plantas de incineración (WTE) resultan las menos atractivas desde una mirada integral** (económica, por el bajo precio de comercialización de la energía; social, por el potencial rechazo de la población, y ambiental, por el no aprovechamiento de materia orgánica y nutrientes). Las tecnologías que presentan escenarios **más convenientes** –desde el punto de vista económico, social y ambiental– son, según lo analizado, el **compostaje y el uso de residuos como un combustible alternativo en la fase industrial de producción de cemento (CDR y BioCDR)**.



Para implementar estas soluciones se requiere instalar una planta de tratamiento mecánico biológico (TMB), la que deberá estar acompañada de una clasificación en origen de tres fracciones que permita obtener productos de mayor calidad, así como del desarrollo de acuerdos y mercados para la colocación del compost, el CDR y el BioCDR. Sobre este último se recomienda realizar un análisis acerca de las posibles implicaciones de la creación de monopolios u oligopolios en la demanda de determinados productos, ya que cuando el comprador es quien determina el precio y las condiciones de compra se puede poner en riesgo la viabilidad del proyecto. Más aún, a la hora de celebrar los contratos con los compradores será necesario contar con un análisis de riesgos y establecer cláusulas que garanticen las condiciones para ambas partes (calidad del producto, plazos y precios). Asimismo, también deberán considerarse los costos de desarrollo de estos mercados.

Como se dijo, la eficiencia de la segregación y la calidad de los productos de este tipo de plantas se encuentran directamente relacionadas con la calidad de los residuos de entrada. El compostaje solo tiene sentido en la medida en que los residuos orgánicos que ingresan provengan de una clasificación en origen; de lo contrario, deberán ser destinados al uso como BioCDR, la cobertura de relleno sanitario o la disposición en terreno (relleno sanitario). Por este motivo, se recomienda implementar un sistema flexible, que pueda ir evolucionando y acompañando el desarrollo de las infraestructuras de recolección selectiva, a la par de que se vaya logrando una mayor adhesión de la población.²⁵

²⁵ Cabe señalar que el presente estudio no incluyó el análisis de los cambios asociados al sistema de recolección hacia un diseño de recolección selectiva en tres fracciones que acompañe el aumento de la adhesión de la población a la segregación en origen.



REFLEXIONES FINALES

Hoy en día, la toma de decisiones vinculadas a la adecuada gestión de residuos constituye un desafío complejo para las autoridades locales y nacionales. La evidencia creciente que existe sobre las consecuencias ambientales del manejo inapropiado de residuos, así como la resistencia social hacia cualquier solución ambientalmente válida,²⁶ vuelven perentorio implementar estrategias más sostenibles. A su vez, las nuevas alternativas tecnológicas requieren mayores inversiones y costos de operación, así como de un involucramiento activo de la sociedad en las fases tempranas de su desarrollo. En ese sentido, la propuesta metodológica presentada tiene el propósito de brindar una visión más integradora y equilibrada, ofreciendo elementos objetivos a la hora de definir una estrategia de valorización de residuos. Incluso más allá de los resultados puntuales que puedan obtenerse, se destaca el camino de apropiación y el proceso de maduración de los distintos actores, posibilitando la construcción de una visión compartida y el establecimiento de acuerdos para avanzar los próximos pasos. En cualquier caso, la implementación final del proyecto dependerá fundamentalmente de decisiones políticas basadas en la evolución de la coyuntura social y económica.



²⁶ A modo de ejemplo, en el área metropolitana de Montevideo no se ha logrado avanzar en el desarrollo de nuevos rellenos sanitarios por las fuertes resistencias de la población vecina a las ubicaciones propuestas. Se han impulsado soluciones regionales (Intendencia de Montevideo, con base en las recomendaciones del Plan Director de Residuos de Montevideo y su área Metropolitana, 2008) y a nivel departamental (2019, Canelones) que, a la fecha de redacción del presente documento, aún no han logrado concretarse.

No obstante, del análisis realizado surgen algunos elementos de reflexión que se exponen a continuación.

Todas las alternativas tecnológicas propuestas requieren una tarifa tal que permita viabilizar la factibilidad económico-financiera de este tipo de servicios. Este aspecto, que es bien conocido por los actores del sector de residuos, muchas veces resulta subestimado por los encargados de formular políticas o la propia población, toda vez que se asume que la venta de energía, de reciclables y de enmiendas orgánicas podría costear la operación del sistema.

Es necesario visualizar los residuos como materiales para un nuevo proceso y no como un elemento descartable. Para ello, se deben internalizar los conceptos de *valorización de materiales*, más que de *valorización de residuos*, y de *producto usado*, en vez de *residuo*. Asimismo, las tecnologías expuestas podrían obtener mayores niveles de eficiencia (es decir, incrementar la recuperación de materiales) si los productos comerciales e industriales fueran diseñados con miras a facilitar su recuperación luego de su uso y se implementaran estrategias adecuadas de recolección selectiva. Los buenos resultados también estarán vinculados con la manera en que participe la población, lo cual podrá ser reforzado desde las políticas públicas con acciones que reconozcan la participación, que penalicen la no adhesión a los sistemas propuestos o con el cobro de una tasa por gestión de residuos.

Por otra parte, aún no se cuenta con los mercados necesarios para comercializar todos los subproductos resultantes de las tecnologías de valorización de materiales. Por eso, una vez definida la solución que se implementará, deberá trabajarse en una estrategia integral donde se impulsen el uso de materiales reciclables en la producción de nuevos productos, la utilización del CDR y el uso del compost, así como la administración de beneficios fiscales para los consumidores de este tipo de recursos y la puesta en marcha de campañas efectivas y permanentes de comunicación y educación para modificar el comportamiento de la población. Estas acciones siempre deben estar enmarcadas en una estrategia de minimización de la generación de residuos, que constituye el primer paso para una gestión moderna y eficaz. En este contexto, donde, como se dijo, no resulta fácil encontrar mercados para ciertos materiales, la valorización energética aparece como una solución sumamente atractiva. En efecto, en la actualidad existen distintas alternativas (WTE, biogás, CDR) y la selección de la más adecuada dependerá principalmente de la composición de la matriz energética local y los precios de la energía. Sin embargo, la implementación de la valoración energética suele verse acotada, entre otros factores, por: i) los bajos precios de las energías renovables (solar, eólica e hidráulica), ii) los aspectos logísticos vinculados al transporte de materia prima (traslado del CDR a la cementera) y la capacidad máxima de las cementeras para sustituir combustibles y iii) los altos costos de los procesos de mejora de calidad (pasar de biogás a biometano).



Parece oportuno señalar que todas las alternativas requieren una participación activa de los actores involucrados directa o indirectamente en la solución (empresas recicladoras, cementeras, potenciales usuarios de compost y vecinos de la zona donde se implementará la solución, entre otros). Considerando las resistencias sociales y los desafíos vinculados a los mercados para los distintos productos obtenidos, desde el inicio del proceso es necesario contemplar a todos los actores así como a dichos elementos condicionantes en el diseño, a fin de disminuir los riesgos a la hora de la implementación del proyecto. En este punto corresponde destacar el trabajo de los/as recolectores/as informales de residuos y las condiciones de vulnerabilidad en que desarrollan su tarea, señalando que la propuesta deberá prever una forma justa de incluirlos laboralmente en las distintas etapas del sistema de valorización (recolección selectiva, clasificación en planta, compostaje).

Como se desprende de los escenarios planteados para Montevideo, la solución podrá consistir en una combinación de las tecnologías expuestas, dependiendo su configuración de las particularidades locales en cada caso. Sus resultados recién podrán ser apreciados a largo plazo, siendo aconsejable desarrollar soluciones tecnológicas flexibles que permitan un sistema más resiliente en un mundo que se encuentra en constante cambio. La implementación de la solución elegida deberá hacerse, necesariamente, de forma gradual y por etapas, lo que permitirá mejorar su viabilidad financiera, considerar los avances en materia de desarrollos tecnológicos y promover –y asimilar– los cambios de comportamiento de la población. Para llevar a cabo todo esto de forma exitosa, un aspecto clave tiene que ver con mantener una visión de largo plazo y establecer una hoja de ruta que trascienda los períodos electorales.²⁷ Además, para el armado de los acuerdos necesarios, también será importante contar con estudios técnicos que aporten certeza y objetividad, disminuyendo los riesgos vinculados a visiones subjetivas o a la repetición de modelos que solo son válidos para contextos determinados.

En una situación general de escasez de recursos, falta de lugares adecuados y aceptados por la población para la disposición final de residuos y concreción de nuevos marcos normativos y acuerdos internacionales²⁸ que promueven la valorización de materiales, es imperioso repensar el modelo de economía lineal –cuya lógica impulsa a “extraer, producir y desechar”– y tomar las oportunidades que ofrece la economía circular como una estrategia superadora de sostenibilidad alternativa.

²⁷ Uruguay es uno de los países líderes en el mundo en producción de energía renovable, junto con Dinamarca, Alemania, Portugal y España, según datos de IRENA (2019). Este logro es resultado del proceso que inició con una Política Nacional Energética en 2008 y un acuerdo multipartidario en 2010.

²⁸ Por ejemplo, a nivel de normativa nacional, se han aprobado diversas leyes, como la Ley Integral de Residuos en Uruguay y Brasil o la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor en Chile, entre otras. A nivel de acuerdos internacionales, se destacan los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas o el Green Deal (Pacto Verde) de la Comisión Europea.



REFERENCIAS

- Colturato F., M. J. González, M. Robano y C. Troncoso. 2019. Diseño del plan estratégico de valorización y disposición de residuos sólidos para Montevideo. Diagnóstico. Documento interno de consultoría. Montevideo: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Confalonieri A., J. Campagnol, V. Brambilla y M. Centemero. 2016. Twelve years of quality assurance system on compost in Italy. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 3 (1): 33-39.
- Correal, M. De próxima publicación. Hacia la valorización de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. Basado en el “*Estudio de técnicas alternativas de tratamiento, disposición final y/o aprovechamiento de residuos sólidos - Propuesta de ajuste al Decreto 838 de 2005*”, financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo.
- EIU (The Economist Intelligence Unit). 2017. *Avances y desafíos para el reciclaje inclusivo: Evaluación de 12 ciudades de América Latina y el Caribe*. Nueva York, NY: EIU. Disponible en: https://reciclajeinclusivo.org/wp-content/uploads/2017/05/EIU_Inclusive-Recycling_report-SPANISH.pdf.
- Ellen MacArthur Foundation. 2015. *Delivering the Circular Economy - A toolkit for policymakers*. Disponible en: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/government/EllenMacArthurFoundation_Policymakers-Toolkit.pdf.
- INE (Instituto Nacional de Estadística de Uruguay). 2011. Censos 2011. Disponible en: <http://www.ine.gub.uy/censos-2011>.
- . 2020. Estudio demográfico de la Oficina de Planeamiento y Presupuesto. Montevideo: INE.
- IRENA (International Renewable Energy Agency). 2019. Innovation landscape for a renewable-powered future. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2019/Feb/Innovation-landscape-for-a-renewable-powered-future>.

- IRP (International Resource Panel). 2019. *Global Resource Outlook, 2019: Natural Resources for the Future We Want*. Disponible en: <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook>.
- ISWA (International Solid Waste Association). 2018. *The Impact of the 4th Industrial Revolution on the Waste Management Sector*. Baltimore, EE. UU.: ISWA. Disponible en: https://www.iswa.org/index.php?eID=tx_iswaknowledgebase_download&documentUid=4945.
- LKSur. 2015. Estudio de caracterización para Montevideo. Montevideo, Uruguay: LKSur. Disponible en: www.miem.gub.uy/sites/default/files/valorizacion_de_residuos_-_informe_1_-_montevideo.pdf.
- Martínez Arce, E., D. Daza y P. Tello Espinoza. 2011. *Informe de la evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe 2010*. Washington, D.C.: BID/AIDIS/OPS. Disponible en: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Informe-de-la-evaluaci%C3%B3n-regional-del-manejo-de-residuos-s%C3%B3lidos-urbanos-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-2010.pdf>.
- MIEM (Ministerio de Industria, Energía y Minería). 2020. Balance energético nacional 2019. Disponible en: <https://ben.miem.gub.uy/>.
- ONU Medio Ambiente. 2018. *Perspectiva de la gestión de residuos en América Latina y el Caribe*. Ciudad de Panamá, Panamá: ONU Medio Ambiente. Disponible en: <https://www.unep.org/es/resources/informe/perspectiva-de-la-gestion-de-residuos-en-america-latina-y-el-caribe>.
- Pinasseau, A., B. Zerger, J. Roth, M. Canova y S. Roudier. 2018. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Treatment Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/407967, JRC113018. Disponible en: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC113018/jrc113018_wt_1_22-01-2018pubsy.pdf.
- Saaty Thomas L. 2001. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with The Analytic Hierarchy Process*. Series, Vol. VI. ISBN 9781888603156. RWS Publications, Pittsburgh.
- Themelis, N. J. y M. E. Díaz Barriga. 2012. Estudio de pre-factibilidad técnica y económica para la instalación de capacidad de generación de energía a partir de residuos (WTE) en Uruguay.

ANEXO

INSTRUMENTOS PARA COMPARAR PROYECTOS EN DISTINTOS ESCENARIOS

La descripción que se presenta a continuación fue tomada del documento *Diseño del plan estratégico de valorización y disposición de residuos sólidos para Montevideo*, de Colturato et al. (2019).

Análisis costo-beneficio

El ACB considera los beneficios y costos de un escenario, modelando un flujo de fondos que permite visualizar la generación de riqueza y evaluar el costo de oportunidad de invertir en determinado proyecto por parte de una empresa o un gobierno.

Como se indicó previamente, el flujo de beneficios y costos se basa en un estudio incremental, también denominado “con y sin proyecto”. El flujo de beneficios y costos de, por ejemplo, el escenario 4, se construye cuantificando aquellos beneficios y costos que la implementación del escenario 4 conlleva de manera incremental con respecto al escenario 0.

Principalmente, el ACB emplea dos indicadores: el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR). Desde la perspectiva de estos indicadores, la racionalidad económica plantea que la inversión en una combinación tecnológica de valorización y disposición de residuos será viable siempre que el VAN sea positivo y la TIR supere a la tasa de descuento (utilizada como costo de oportunidad del uso de los fondos). Asimismo, para seleccionar entre distintos escenarios alternativos se tomará el que exhiba los mayores valores de estos indicadores.

Existen tres enfoques para realizar el ACB, según se ponga el énfasis en la inversión (enfoque financiero), el inversionista o la economía en su conjunto (enfoque socioeconómico). El enfoque financiero, también conocido como de *rentabilidad sobre activos*, construye un flujo de fondos con los ingresos y egresos relacionados con el escenario y sin considerar el financiamiento de terceros, es decir que no tiene en cuenta si corresponden a los propietarios de los fondos o a sus acreedores. De esa manera, el análisis costo-beneficio con enfoque financiero permite concentrar la información en la generación neta de recursos de la alternativa tecnológica y su viabilidad, sin necesidad de definir al actor que gestione dichas tecnologías y con independencia de las fuentes de financiamiento que se requieran, dando cuenta de la conveniencia económica (o no) del escenario bajo análisis.

El segundo enfoque –conocido como *del inversionista*– incorpora en el flujo de fondos la información correspondiente al financiamiento de la inversión, incluidos los préstamos bancarios y los pagos de capital e intereses. Esto permite evaluar las bondades de las distintas alternativas existentes para financiar la implementación del escenario, estimando la rentabilidad que la inversión promete para quienes aportan los fondos. Este enfoque no se considera apropiado para comparar alternativas tecnológicas de valorización y disposición final, pero sí puede ser utilizado luego de tomar la decisión sobre el escenario con el que se desea avanzar.

El tercer enfoque –socioeconómico o de la *economía en su conjunto*– incluye el análisis de los costos y beneficios que el escenario genera sobre el resto de la sociedad, incluyendo los costos de oportunidad que tiene para la economía el asignar recursos a la alternativa tecnológica en estudio. Esta modalidad permite evaluar la conveniencia del escenario para la sociedad en su conjunto, englobando a los agentes indirectamente relacionados con la ejecución del proyecto. Para ello, se emplean precios de eficiencia económica, que evitan las distorsiones propias de los mercados y permiten contabilizar los beneficios y costos de las externalidades. Una de las principales dificultades que enfrenta este enfoque se presenta a la hora de determinar y valorar los beneficios económicos, ya que en la mayoría de los casos no pueden obtenerse a partir del análisis privado o de mercado. Para esta modalidad se requiere determinar un valor actual neto económico (VANE) y una tasa interna de retorno económico (TIRE).

En suma, el primer enfoque brinda una aproximación a la viabilidad financiera de invertir y operar una combinación tecnológica de valorización y disposición final de residuos. Por su parte, el tercer enfoque, el enfoque socioeconómico, al incorporar los efectos indirectos y externalidades que el escenario elegido provoca sobre la economía, presenta una medida de la racionalidad o conveniencia para el conjunto de la sociedad, convirtiéndose en el enfoque más pertinente para evaluar inversiones vinculadas con servicios públicos, como el caso de la disposición final de residuos sólidos municipales, superando así la mirada estrecha que pueden tener

las inversiones privadas.

Análisis multicriterio

El análisis multicriterio (AMC) propone un análisis multidimensional, combinando múltiples variables (cuantitativas y cualitativas), más allá de que puedan ser expresadas en términos monetarios. Thomas Saaty propone una de las metodologías de AMC más utilizadas a nivel internacional: se trata del llamado proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés).

Con base en la habilidad humana innata para emitir juicios fundados sobre una sucesión de pequeños problemas, emplea la comparación por pares de distintas criterios de ponderación para arribar a un juicio global.

Los criterios considerados y su contribución para el caso de las tecnologías de valorización de residuos y su contribución al resultado global pueden observarse en el cuadro A1.

Cuadro A1. Contribución directa o inversa de cada criterio al resultado global

Criterio	Contribución
Recuperación de recursos	Directa: Cuanto mayor recuperación, mayor contribución.
Reducción de emisiones líquidas y atmosféricas	Directa: Cuanto mayor reducción, mayor contribución.
Generación de rechazo	Inversa: Cuanto menor espacio requerido, mayor contribución. Cuanto mayor sea el rechazo, mayor necesidad habrá de espacio en un relleno sanitario, lo cual es negativo para el sistema. Por lo tanto, un valor mayor de este indicador es un menor aporte.
Disponibilidad de terrenos	Directa: Cuanta mayor disponibilidad, mayor contribución
Inversión en capital (CAPEX)	Inversa: Cuanta menor CAPEX, mayor contribución.
Costos de funcionamiento (OPEX)	Inversa: Cuanto menor OPEX, mayor contribución
Ingresos por valorización	Directa: Cuanto mayor ingreso, mayor contribución.
Facilidad de gestión del sistema institucional	Directa: Cuanto mayor facilidad, mayor contribución.
Facilidad de gestión del sistema tecnológico	Directa: Cuanto mayor facilidad, mayor contribución.
Generación de empleo	Directa: Cuanto mayor empleo generado, mayor contribución.
Generación de conciencia ambiental	Directa: Cuanta mayor conciencia generada, mayor contribución.
Aceptación de la población	Directa: Cuanta mayor aceptación, mayor contribución.
Afectación del entorno local	Inversa: Cuanta mayor afectación, menor contribución.

Fuente: Elaboración propia.

Estos criterios fueron definidos con base en la bibliografía de referencia y las opiniones y experiencias del equipo consultor y el equipo técnico del Departamento de Desarrollo Ambiental de la Intendencia de Montevideo.

En cuanto a los ponderadores, su definición requirió de un proceso para evaluar la importancia relativa de todos los criterios definidos, mediante juicios que se emiten en comparaciones de pares. Tal mecanismo encuentra su fundamento en la disciplina psicológica, la cual indica que para las personas resulta más fácil realizar juicios dicotómicos (entre dos elementos) que hacerlo sobre un conjunto de criterios. Para obtener los juicios binarios de las dimensiones y los criterios definidos para evaluar las alternativas tecnológicas se recurrió a la opinión de los especialistas en gestión de residuos, tanto nacionales como internacionales.

Con respecto a los indicadores, se utilizan para valorar la contribución de cada escenario al criterio en cuestión mediante una forma de medición concreta. Algunos indicadores son de carácter cuantitativo, como los que pueden medirse en toneladas, m², unidades monetarias o número de empleos, mientras que otros son de corte cualitativo, como los referidos al grado de facilidad de gestión de los sistemas institucional y tecnológico, la generación de conciencia o la aceptación de la población, y se valoran a través de rúbricas con valores predefinidos para el indicador.

Si se combinan los ponderadores obtenidos mediante el juicio de los expertos y los indicadores definidos para cada uno de los criterios, se obtiene un puntaje global para cada escenario, permitiendo una jerarquización que considera las dimensiones ambiental, económica, operativa y social.

