



XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país



DE RESIDUOS A RECURSOS



María José González*

Maestría en Ingeniería Ambiental, Ingeniera Civil Hidráulica, como consultora para el BID y Naciones Unidas asesora al MIEM en temas de economía circular y energía. Fue directora de Cempre Uruguay, coordinó el proyecto Biovalor y hoy coordina el programa de hidrógeno verde en Uruguay.

Mariana Robano

Maestría en Mecánica de los Fluidos Aplicada, Ingeniera Civil Hidráulica socia directora de ReAcción. Especialista en economía circular y gestión de residuos.

TEMA: 3: Residuos sólidos: urbanos, industriales y peligrosos; recolección, disposición final, valorización, reciclaje, reúso. Biosólidos y su gestión. Normativa.

Dirección del autor principal (*): Ibiray 2308, Montevideo – Uruguay - Tel.: +598 99620655 – e-mail: mjgonzalez.rodriguez@gmail.com

Palabras Clave: Residuos, Valorización, Tecnologías, Análisis multicriterio, Análisis Costo-Beneficio

RESUMEN

El trabajo se enfoca en analizar distintos escenarios tecnológicos para la valorización de residuos de la ciudad de Montevideo y recomendar una solución. Teniendo en cuenta un abanico grande de posibilidades tecnológicas de valorización de residuos, se proponen dos metodologías de análisis que buscan facilitar la toma de decisión desde distintas perspectivas. Las metodologías consideradas son el Análisis Costo Beneficio y el Análisis Multicriterio.

Para la identificación y descripción de las tecnologías a ser consideradas para la definición de escenarios se tomaron los Documentos de Referencia (Best Available Techniques BAT – Reference Documents - BREF): i) Tratamientos Mecánicos (Plantas de clasificación y Plantas de Recuperación de Materiales), ii) Tratamientos Biológicos (Digestión Anaerobia y Compostaje) y iii) Tratamientos Térmicos (Incineración, Pirolysis y Gasificación). En base a estas tecnologías y las posibilidades de valorización se definen 6 escenarios a analizar y se comparan de acuerdo a las metodologías propuestas, de esto surge una priorización de los mismos.

En base a los resultados obtenidos se descartan las soluciones vinculadas a la implementación de plantas de incineración así como de digestión anaerobia. Las tecnologías que presentan escenarios más convenientes desde el punto de vista económico, social y ambiental son el compostaje y el uso de residuos como un combustible alternativo en la fase industrial de producción de cemento. Para la implementación de estas soluciones es necesario desarrollar una planta de tratamiento mecánico biológico acompañada de una clasificación en origen en tres fracciones que permita una mejor calidad de los distintos productos obtenidos.



XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país



INTRODUCCIÓN

En Uruguay, desde el año 2007, se aplica la Ley de Envases basada en el principio de responsabilidad extendida al fabricante-importador (REP) implementando la separación en origen por parte de la población en algunas ciudades, entre ellas Montevideo. La escasa adhesión de la población a este sistema así como las deficiencias que presentan los sistemas de recolección selectiva y valorización de residuos, hacen que gran parte de los residuos generados sean enterrados en relleno sanitario.

La disposición final en el relleno sanitario Felipe Cardoso se inició en la década del '90 siendo originalmente un vertedero, el cual a lo largo de los años, y a medida que fue creciendo, se convirtió en el actual relleno sanitario. Se destaca la infraestructura existente para su correcta operación, el cual cuenta con control de ingreso, balanza y software de registro, cerco perimetral, celdas impermeabilizadas, recolección y tratamiento tanto de lixiviado como de gases, así como con la maquinaria necesaria para el tendido y compactación de los residuos. Además está prohibido el ingreso de personas dedicadas a la recuperación de residuos.

En la última década la ciudad enfrenta el desafío de la falta de espacio para la disposición final de residuos. Los estudios realizados indican que dentro del territorio departamental no hay disponibilidad de sitios para la ubicación de un nuevo relleno sanitario. Se hace inminente entonces la optimización y la prolongación de la vida útil del relleno actualmente en uso, denominado "Felipe Cardoso". De acuerdo a los últimos proyectos de ampliación la vida útil remanente del sitio es de unos 8 a 10 años, la que podrían aumentarse si se desvía el ingreso de los residuos de construcción y se implementan alternativas de valorización de residuos urbanos.

OBJETIVOS

El trabajo se enfoca en analizar distintos escenarios tecnológicos para la valorización de residuos de la ciudad de Montevideo y recomendar una solución.

MATERIALES Y MÉTODOS

Teniendo en cuenta un abanico grande de posibilidades tecnológicas de valorización de residuos, se proponen dos metodologías de análisis que buscan facilitar la toma de decisión desde distintas perspectivas. Las metodologías consideradas son el Análisis Costo Beneficio (ACB) y el Análisis Multicriterio (AMC).

El análisis costo beneficio es el método por excelencia en la evaluación de proyectos de inversión, siendo una herramienta que permite evaluar la eficiencia de las decisiones acerca del uso de recursos escasos para la implementación de un proyecto. Se aplica tanto en la evaluación privada de proyectos (comúnmente identificada como evaluación financiera) como en la evaluación económica o también denominada desde el punto de vista social o socio-económica.

En este marco, el término proyecto refiere a las diferentes combinaciones tecnológicas de valorización y disposición final de residuos sólidos urbanos plasmadas en los distintos escenarios que se consideren.

En términos generales, el ACB considera los beneficios y costos de un escenario, elaborando un flujo de fondos que permite obtener un valor de la generación de riqueza evaluando el costo de oportunidad de asignar recursos a ese escenario tecnológico, permitiendo concluir si con su ejecución se logran mejores condiciones. Los beneficios y costos considerados son aquellos para los cuales es posible expresarlos en términos monetarios.



XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país



El flujo de beneficios y costos se basa en un estudio incremental, también denominado “con y sin proyecto”, con el que se identifican los beneficios y costos asignables a la alternativa tecnológica de valorización y disposición de residuos bajo análisis, diferenciándolos de lo que sería la evolución en el tiempo si no se implementara este escenario, situación identificada como escenario 0. De esta forma, 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 respecto al escenario 0.

El ACB emplea principalmente dos indicadores para estudiar la conveniencia de realizar una inversión: el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). La racionalidad económica bajo estos indicadores plantea que la inversión en una combinación tecnológica de valorización y disposición de residuos es 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); mientras que para la selección entre distintos escenarios alternativos se tomará la que exhiba el mayor valor de estos indicadores.

El Análisis Multicriterio permite incorporar la mirada multidimensional abordando el problema de la gestión de residuos combinando múltiples variables, cuantitativas y cualitativas, de forma de cubrir diferentes dimensiones de análisis más allá de las únicamente monetizables.

A modo de ejemplificar lo anterior, se pueden identificar algunas variables ambientales como el potencial de generación de emisiones líquidas y atmosféricas de una determinada tecnología, lo cual es complejo y costoso de cuantificar monetariamente como para incluirlo en un análisis costo beneficio; por otro lado, se puede incorporar requerimientos institucionales y normativos para implementar una tecnología que tampoco es posible expresar en flujos monetarios.

Para llevar a cabo el ejercicio de comparación y priorización de los escenarios de valorización y disposición de residuos de Montevideo, se siguió una de las metodologías de análisis multicriterio más difundidas y aplicadas a nivel internacional: el método denominado Proceso Analítico Jerárquico o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), planteado por Thomas L. Saaty (1997). Este esquema se basa en la habilidad innata humana de 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 compuesto, entre otros, por i) **criterios**, ii) **agregación-ponderadores** e iii) **indicadores**, que brinda un resultado que permite comparar la bondad de cada escenario y con ello poder obtener una priorización entre ellos, o sea, un orden de jerarquía que indique acerca de la conveniencia estratégica de cada uno.

Para la toma de decisión vinculada a tecnologías de valorización de residuos, se propone considerar cuatro dimensiones que permitan tener la visión integral: ambiental, económica, operativa y social. Para cada una de estas dimensiones se establecen una serie de criterios, que para este tipo de tecnologías se recomiendan los siguientes:



25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país

Tabla 1: Dimensiones y criterios considerados [1].

Dimensiones	Criterios	Descripción del criterio
Ambientales	Recuperación de recursos	Capacidad de recuperar, reusar o reciclar materiales, nutrientes, materia orgánica, suelos así como beneficios respecto a posibilidad de regenerar ecosistemas
	Generación de emisiones líquidas y atmosféricas	Potencial de generación de emisiones líquidas y atmosféricas, incluidos provenientes de la disposición de los rechazos
	Generación de rechazo	Cantidad y calidad de residuos a disponer en terreno luego de la operación
	Disponibilidad de terrenos	Disponibilidad de terrenos en el departamento (de acuerdo a los requerimiento de área para la instalación de la tecnología)
Económicos	Costos de inversión (CAPEX)	Costos de montaje de infraestructuras, equipos y adquisición de terrenos, así como costo de cierre
	Costos operativos (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, políticas y normativas 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 operación de la misma
Sociales	Generación de empleo	Capacidad de generar empleo de calidad, teniendo en cuenta en particular situación de clasificadores de residuos
	Generación de conciencia ambiental	Aporte a construir conciencia ambiental en la población
	Aceptación de la población	Aceptación del tipo de tecnología por parte de la población
	Afectación del entorno local	Riesgo de afectación a la salud de la población y actividades productivas locales



XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible



25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país

Cada uno de estos criterios aporta de forma positiva o directa y otros a la inversa. Por ejemplo, el criterio “Recuperación de recursos” aporta de forma directa y cuanto mayor recuperación, mayor es la contribución. En cambio, el criterio “Generación de Rechazo”, aporta de forma inversa ya que a mayor valor de rechazo, menor es la valorización positiva para dicho escenario.

Para la identificación y descripción de las tecnologías a ser consideradas para la definición de escenarios se tomaron los Documentos de Referencia (Best Available Techniques BAT – Reference Documents - BREF). Para el sector de gestión de residuos existen dos documentos BREF, denominados BREF Waste Incineration (2018) que incluye las mejores técnicas en el tratamiento térmico de los residuos y BREF Waste Treatment que se refiere a las mejores técnicas en el tratamiento de los residuos sólidos diferentes a los térmicos. El BREF de tratamiento térmico de residuos, considera técnicas de incineración, pirólisis y gasificación, mientras que el BREF de tratamiento de residuos aborda técnicas de tipo biológico y mecánico. Teniendo en cuenta estos documentos y el estado de madurez tecnológica, las soluciones se agrupan 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)

En cada escenario y según el tipo de tecnología se obtienen distintos productos valorizables que pueden agruparse en i) materiales reciclables, ii) enmiendas orgánicas y iii) energía (eléctrica, biometano o combustibles sólidos alternativos / combustibles derivados de residuos CDR o biosólidos).

Considerando la situación de la matriz energética nacional y en particular la alta penetración de energías renovables en la red eléctrica nacional, para uno de los 6 escenarios propuestos se plantea una variación en el diseño (1A, 1B). Esta modificación apunta a gestionar el momento en el que la energía es inyectada a la red (almacenando el biogás generado), de forma de realizarlo cuando la demanda de energía eléctrica es mayor.

Las plantas de tratamiento mecánico biológico (por sus siglas en inglés MBT) que permiten la recuperación de materiales reciclables, materiales que pueden ser utilizados como combustible alternativo, así como materia orgánica y nutrientes, tienen mayores niveles de eficiencia y calidad de productos finales en la medida que los residuos que ingresan a la planta tienen un mayor nivel de segregación en origen. Entendiendo que la separación en origen en domicilios se irá obteniendo gradualmente, las plantas de MBT de los distintos escenarios son planteadas como una alternativa que permitirá incorporar gradualmente líneas específicas de recuperación de materiales separados en origen de forma de obtener mejores productos y por lo tanto mejores ingresos a futuro.

El escenario 1 propone recuperar en primera instancia los reciclables (envases, metales, cartones y papeles) a través de una planta de recuperación de materiales (PRM) derivando los finos para una instalación de digestión anaerobia y los materiales de poder calorífico significativo que no están en condiciones de ser reciclados (muy sucios o muy pequeños) son acondicionados como un Combustible Derivado de Residuos. El biogás recuperado en la unidad biológica anaerobia es utilizado para generar energía eléctrica de forma constante a lo largo del día en el escenario 1A) o almacenado para volcar al sistema interconectado nacional en los momentos de mayor demanda, en el caso del escenario 1B).

El escenario 2 es igual al escenario 1, pero en lugar de utilizar el biogás para energía eléctrica, es purificado para llevarlo a biometano (filtrando los gases no deseados y llevando a un mayor porcentaje de metano). Este gas es llamado biometano y tiene características iguales a las del gas natural, por lo que es factible inyectarlo a la red de gas natural existente.



25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país

En el escenario 3, se propone una PRM, recuperando reciclables y CDR pero el tratamiento biológico consistiría en unidad de estabilización aerobia (compostaje). Solo se recupera energía a través del CDR pero no con la unidad biológica.

El escenario 4, consta de una PRM (con reciclables y CDR) pero la fracción “finos” provenientes de la PRM, en vez de ser tratados biológicamente, son secados para ser utilizados como cobertura de relleno sanitario o como BioCDR (poder calorífico del 8 – 10 MJ/kg).

El escenario 5 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 (incineradora) WTE, en base a tecnologías como la parrilla. La energía generada por la WTE puede ser eléctrica y térmica, de generación firme (no es posible realizar variaciones significativas en la generación a lo largo del tiempo).

Finalmente, el escenario 6 propone una combinación de los escenarios anteriores, instalándose una PRM que recupere reciclables (no CDR), una unidad biológica que será estabilización aerobia (por su sencillez operativa y costos de inversión) y los rechazos de estas dos unidades son enviados a una WTE de menor porte para la generación de energía eléctrica y térmica.

Para cada uno de los escenarios propuestos, se presentó un balance preliminar de ingresos y salidas de las plantas.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados de la aplicación del Análisis Costo Beneficio se presentan a continuación:

Tabla 2: Resultados del Análisis Costo Beneficio desde el punto de vista financiero y desde el punto de vista socio-ambiental [1].

Indicador	Escenarios							
	E1A	E1B	E2	E3A	E3B	E4	E5	E6
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	19,1	6,8	43,9	60,6	78,7	76,5	-353,9	-212,9
TIRE	11,2%	8,6%	16,3%	24,3%	30,6%	31,9%	-14,2%	-8,5%

Nota: A) Expresado en millones de USD constantes de agosto de 2019.

Un primer resultado significativo del ACB es que **ninguno de los escenarios estudiados resulta viable bajo el enfoque financiero**, indicando la no conveniencia de invertir en ellos bajo este enfoque. Esto se observa en los siguientes indicadores:

- **El VAN de todos los escenarios es negativo**, con una alta variabilidad: entre USD 46 y 350 millones según escenario. Ello indica que los fondos que se generan con las alternativas



25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país

tecnológicas de valorización y disposición final de residuos sólidos no alcanzan a superar la inversión requerida.

- **La TIR de todos los escenarios es inferior a la tasa considerada como costo de oportunidad (7,5%), e incluso negativa.** Así, se concluye que invertir en ellos no es conveniente dado que la inversión destinada a su implementación genera una rentabilidad negativa.

Por su parte, **la evaluación bajo el enfoque socioeconómico arroja un resultado diferente al del enfoque financiero**, indicando que en **6 de los 8 escenarios analizados resulta conveniente invertir en ellos**, dado que generan un flujo de beneficios netos que supera el valor de las inversiones iniciales, siendo la excepción a ello **los escenarios E5 y E6 que no resultan inversiones viables**. Los indicadores que sustentan lo anterior son los siguientes:

- **El VANE es positivo en 6 de los 8 escenarios**, con guarismos entre USD 7 y 80 millones expresados a precios de eficiencia; mientras que es **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 6 de los 8 escenarios es superior al costo de oportunidad (7,5%),** ubicándose entre 9% y 32% según escenario, indicando la rentabilidad social de invertir en estas tecnologías; mientras que en los escenarios E5 y E6 la TIRE es negativa, por lo que no resultan rentables para la sociedad en su conjunto.

La comparación de los resultados entre ambos enfoques da cuenta de resultados dispares: no siendo viable bajo la óptica financiera y sí resultando viable en la mirada socioeconómica. O sea, **como proyectos de inversión desde una óptica privada no resulta rentable financieramente invertir en las tecnologías estudiadas. Sin embargo, como estas alternativas generan un conjunto de beneficios sobre la sociedad (económica, ambiental y social), más allá del agente que la gestione, invertir en algunas de ellas si se justifica**, dado que generan un flujo de beneficios netos para la sociedad que supera el valor de las inversiones requeridas.

Los resultados de la aplicación del análisis multicriterio con la contribución de cada escenario por dimensión:

Tabla 3: Resultados del Análisis Multicriterio [1].

Dimensiones	Escenarios									Máximo
	E0	E1A	E1B	E2	E3A	E3B	E4	E5	E6	
Ambiental	0,2%	23,8%	34,0%	34,0%	23,8%	34,0%	23,7%	18,5%	29,5%	39,5%
Económica	20,3%	14,9%	13,2%	14,6%	16,5%	15,9%	15,6%	3,5%	7,9%	23,8%
Operativa	14,6%	6,5%	3,4%	3,4%	9,2%	3,8%	0,6%	5,7%	3,0%	14,6%
Social	1,3%	21,7%	14,0%	18,6%	17,1%	14,0%	10,0%	5,9%	9,4%	22,1%
Global	36,4%	66,8%	64,5%	70,5%	66,5%	67,6%	50,0%	33,7%	49,7%	100,0%

Para la comparación de resultados de ambas metodologías se debe considerar que el ACB evalúa los escenarios desde la eficiencia de la sociedad al momento de asignar sus recursos, considerando



25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país

dimensiones y variables económicas, ambientales y sociales que puedan ser valoradas en términos monetarios. Mientras que el análisis multicriterio realiza una evaluación de los escenarios desde el punto de vista de una estrategia compuesta por las dimensiones y variables que se consideran relevantes para la gestión de residuos, pudiendo ir más allá de las únicamente monetizables, incluso incorporando variables de corte cualitativo. Así, un método prioriza siguiendo la eficiencia de asignación de recursos y el otro según la conveniencia estratégica. Ambos métodos permiten incluir variables ambientales y sociales, pero el ACB solo aquellas que puedan valorarse en términos monetarios.

Comparación de resultados por ambos métodos:

Tabla 4: Comparación de ACB y Análisis Multicriterio [1]

	Descripción	Posición AMC	Posición ACB	Comentario
E2	Biogás a biometano inyectado a la red con CDR	1º	4º	Alta inversión en purificación 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 multicriterio por no recuperar recursos.
E6	Compostaje + WTE	7º	8º	Mal ponderado en ambos métodos. Alto CAPEX y OPEX. 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. Alto CAPEX y OPEX. En la jerarquía de residuos, solo es mejor que relleno sanitario.

En primera instancia cabe señalar que con ambas metodologías, los escenarios E5 y E6 (WTE y Compost+WTE respectivamente) quedan en las últimas posiciones. Este resultado se debe principalmente



XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país



a los altos costos de inversión y operación así como por aspectos ambientales. En el contexto actual de la matriz de energía eléctrica nacional, con una generación de energía renovable superior al 90%, la sustitución energética incide de forma muy marginal en la reducción de emisiones y aumenta por la quema de residuos de origen fósil como son los plásticos. Asimismo, al aprovechar el poder calorífico de los residuos, no se recuperan otros recursos provenientes de la fracción orgánica como son la materia orgánica y otros nutrientes.

En el análisis multicriterio y a juicio de los distintos expertos consultados, los aspectos ambientales y en particular los referentes a la recuperación de recursos, fueron los considerados de mayor relevancia, lo que se ve reflejado en la posición resultante para los escenarios E5 y E6.

En segundo lugar, es de resaltar que en términos generales, **las posiciones en el orden de prioridad que concluye cada método no exhiben mayores diferencias**, habiendo 2 escenarios que quedan igual posicionados y 4 con una diferencia de una posición.

Los **escenarios E2 y E4** son los que presentan una diferencia en los resultados de priorización entre una metodología y otra: el E4 es el prioritario según el ACB y el 6º en el multicriterio, mientras que el E2 es el prioritario según el método multicriterio y 4º en prioridad según el ACB. Este resultado es esperable teniendo en cuenta que en el escenario E2 (biogás usado como biometano) las inversiones son elevadas afectando el resultado con la metodología ACB. Sin embargo en el análisis multicriterio resulta la mejor opción ya que se recuperan recursos y se desplaza un combustible de origen fósil tanto por el gas natural como por el coque utilizado en cementera.

Precisamente la situación inversa se da en el escenario E4 (bioCDR), que en el multicriterio obtiene un resultado menor ya que no recupera recursos al ser todos utilizados como energéticos, pero las inversiones y costos operativos son bajos, obteniendo ingresos interesantes por la venta de material.

Al analizar los resultados del análisis multicriterio, 5 escenarios presentan resultados muy similares (entre 67 y 71%), considerando la precisión de las distintas metodologías. Por lo tanto, parecería razonable que entre estos escenarios (E1A, E1B, E2, E3A y E3B), el valor de TIRE del análisis ACB, como indicador de la mejor asignación de recursos de la sociedad, juegue un rol preponderante en la definición del escenario recomendado.

En base a los resultados obtenidos de los análisis i) costo beneficio y ii) multicriterio presentados, se descartan las soluciones vinculadas a la implementación de plantas de incineración (WTE) así como de digestión anaerobia. Las tecnologías que presentan escenarios más convenientes desde el punto de vista económico, social y ambiental son el compostaje y el uso de residuos como un combustible alternativo en la fase industrial de producción de cemento (CDR y BioCDR). Para la implementación de estas soluciones es necesario desarrollar una planta de tratamiento mecánico biológico (MBT) acompañada de una clasificación en origen en tres fracciones que permita una mejor calidad de los distintos productos obtenidos.

La eficiencia de segregación y calidad de los productos de este tipo de plantas se encuentra directamente relacionado a la calidad de los residuos de entrada. El compostaje solo tiene sentido en la medida que los residuos orgánicos de ingreso provengan de una clasificación en origen; de lo contrario se deberán canalizar los mismos hacia el uso como BioCDR, cobertura de relleno sanitario o disponerlos directamente en el relleno sanitario.

Por lo tanto, se recomienda la implementación de un sistema flexible que irá evolucionando a lo largo del tiempo a medida que se desarrollen las infraestructuras y se logre adhesión de la población para la recolección selectiva.

A continuación se presenta un esquema con los escenarios con mejor resultado según cada metodología:

Figura 1: Esquema del escenario E4, seleccionado según la metodología ACB [1]

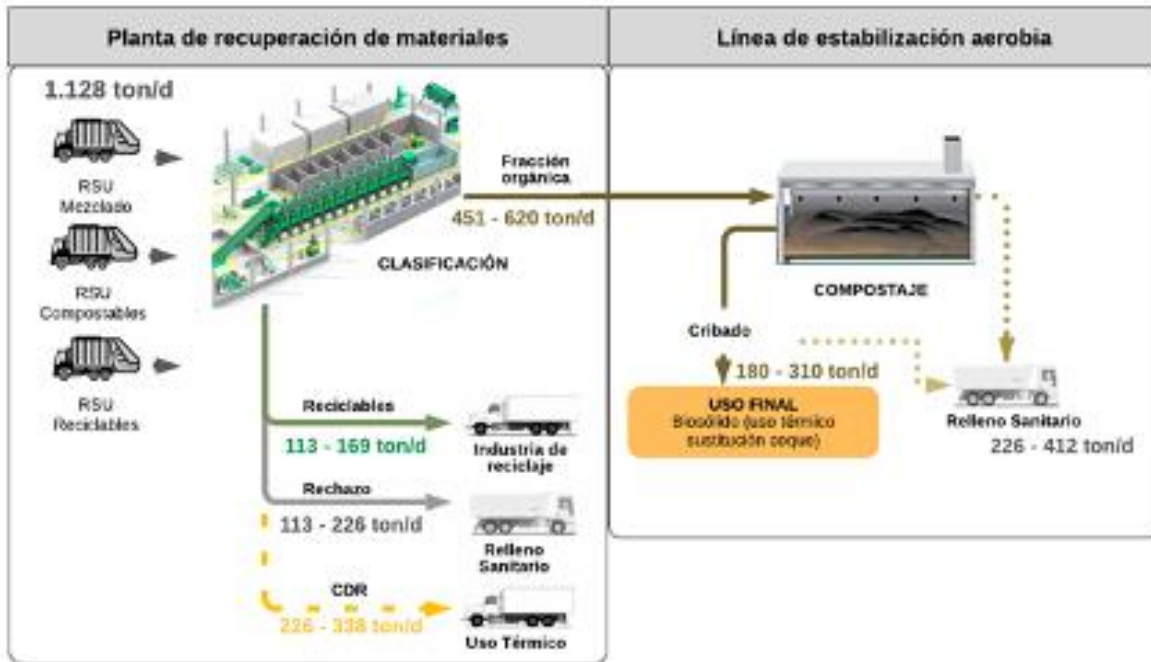
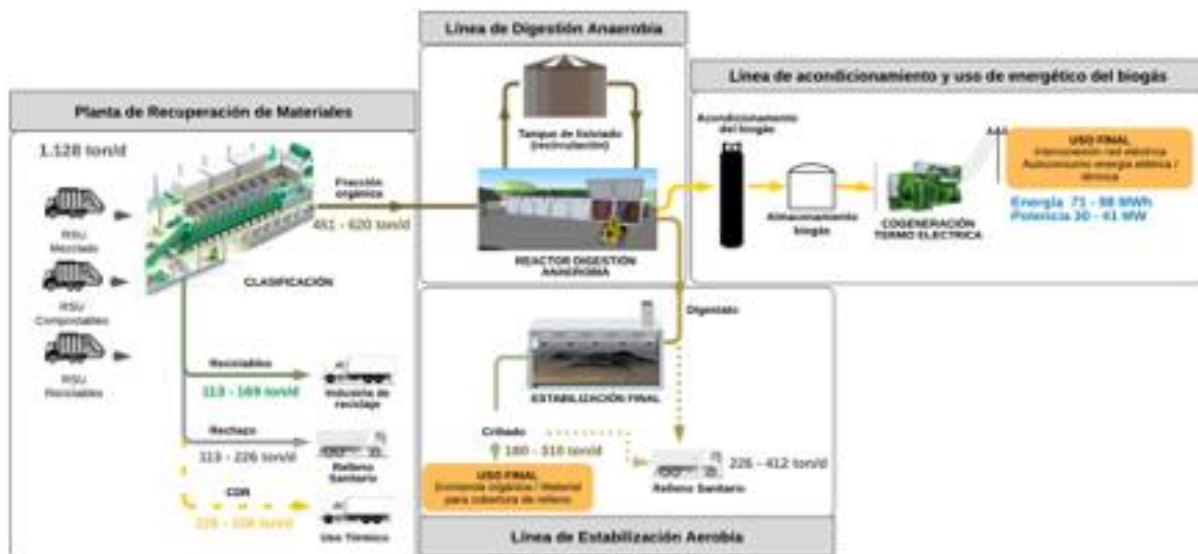


Figura 2: Esquema del escenario E1 b), seleccionado según la metodología multicriterio [1]





Agradecimientos: *El proyecto que permitió obtener los resultados presentados en el presente trabajo fueron financiados por Banco Interamericano de Desarrollo para la Intendencia de Montevideo durante el año 2018. Un especial agradecimiento a nuestros compañeros de equipo consultor, el economista Carlos Troncoso y el ingeniero Felipe Colturato. Asimismo a todo el equipo de la Intendencia y de BID por el apoyo y confianza durante todo el proceso.*

REFERENCIAS

- [1] Robano M., González Ma (2021) De Residuos a Recursos, Nota Técnica IDB-TN-2287.
- [2] APHA, AWWA, WEF (2012) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22nd Edition, American Public Health Association, American Water Works, Water Environment Federation, Washington DC.
- [3] Barber, W. P. F. (2016). Thermal hydrolysis for sewage treatment: A critical review. *Water Research*, 104, 53–71. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.069>
- [4] Devos, P., Haddad, M., & Carrère, H. (2021). Thermal Hydrolysis of Municipal sludge: Finding the Temperature Sweet Spot: A Review. *Waste and Biomass Valorization*, 12(5), 2187–2205. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01130-1>
- [5] Donoso-Bravo, A., Olivares, D., Lesty, Y., & Bossche, H. Vanden. (2020). Exploitation of the ADM1 in a XXI century wastewater resource recovery facility (WRRF): The case of codigestion and thermal hydrolysis. *Water Research*, 175, 115654. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115654>
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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 Pkaneamiento y Presupuesto. Montevideo: INE.
- [12] 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>.
- [13] 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>.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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>.
- [17] 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>.
- [18] Pinasseau, A., B. Zenger, 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



XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país



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.

[19] Saaty Thomas L. 2001. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with The Analytic Hierarchy Process. Series, Vol. VI. ISBN 9781888603156. RWS Publications, Pittsburgh.

[20] 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.