

Final Report

Technology transfer and spread of gasifiers and bio-digesters of
residual biomass to minimize greenhouse gas emissions from
MSW

CTCN request reference number: 2015000063

Country: Ecuador

February 2018

Tabla de contenido

	Pág.
Resumen ejecutivo	5
1. Introducción	7
2. Caracterización de los RSU y los sistemas de manejo de los RSU en Ecuador	8
2.1 Los RSU en Ecuador	8
2.2 Modelo actual de manejo de los RSU en Ecuador	13
2.3 Contenido energético de los RSU e iniciativas de recuperación de energía	16
2.4 Separación, reciclado y recuperación de materiales	18
2.5 Potencial impacto del reciclado sobre las iniciativas de recuperación de energía	20
2.6 Residuos agroindustriales potencialmente gasificables	21
3. Evaluación y caracterización de la tecnología de gasificación	28
3.1 La tecnología de gasificación y su contexto	28
3.2 Gasificador desarrollado por el INER	31
4. Evaluación de aspectos económicos y financieros	33
5. Evaluación de aspectos técnicos	36
6. Análisis del marco institucional y legal	37
7. Análisis de viabilidad integrado, identificación de las principales barreras y estrategias para superarlas	41
8. Conclusiones y recomendaciones	46

Glosario

Co-gasificación: proceso en el cual se mezclan dos materias primas con diferente PCI para gasificar, con el objeto de mejorar la performance del proceso

COOTAD: Código Orgánico de Organización Territorial

GAD: Gobierno Autónomo Descentralizado

GADM: Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal

Gas de Síntesis: gas combustible resultante del proceso de gasificación y formado por proporciones variables de CO, H₂, CH₄, N₂, CO₂ y otros gases

Gasificación: tratamiento térmico consistente en la oxidación parcial de un material utilizando el poder calorífico del mismo para producir un gas de síntesis que puede ser empleado para producir calor y/o energía, o combustibles líquidos

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GIRS: Gestión Integral de Residuos Sólidos

Incineración: tratamiento térmico consistente en la combustión de un material utilizando el poder calorífico del mismo para producir calor y/o energía

INER: Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables de Ecuador

INIAP: Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias

MAE: Ministerio del Ambiente de Ecuador

PCI: Poder Calorífico Inferior

Pirólisis: tratamiento térmico de un material en ausencia de oxígeno para producir una mezcla de gases, líquidos y sólidos con contenido energético

PNGIDS: Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos de Ecuador

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

RDF: Refuse Derived Fuel, combustible recuperado a partir de etapas de separación de residuos sólidos

Up-draft: gasificador de corriente ascendente, donde el gas de síntesis fluye de abajo hacia arriba y la materia prima de arriba hacia abajo

WTE: Waste to Energy, se refiere a toda planta de tratamiento de residuos que incorpora una etapa de recuperación de energía

Resumen ejecutivo

La experiencia internacional de gasificación de RSU indica que con la tecnología de gasificación convencional disponible actualmente no sería factible la obtención de adecuados rendimientos y parámetros de operación a partir de la gasificación de un material heterogéneo como el RSU y que a la vez posee un alto contenido de materia orgánica húmeda y bajo poder calorífico neto, como sería el caso del RSU presente típicamente en Ecuador.

Esta primera limitación circunscribe la potencial utilización de la tecnología propuesta a nichos donde exista elevada disponibilidad de un material adecuado para co-gasificar junto al RSU o bien donde la tipología de materiales presentes en el RSU difiera sustancialmente de los promedios informados para Ecuador en términos de poder calorífico inferior.

El primer nicho podría corresponder a la cogasificación con residuos agroindustriales de elevado PCI (e.g. cuesco de palma). El segundo nicho podría darse al aprovechar los RSU de fuentes muy específicas con mayor contenido de plásticos (e.g. algunos sectores de las grandes ciudades, RSU de instituciones educativas o de establecimientos comerciales, plásticos no reciclables recuperados en una planta de separación de residuos), en cuyo caso la escala y la logística de recolección deben ser estudiadas en detalle para determinar la viabilidad. El presente estudio avanza en la caracterización de dichos nichos.

La co-gasificación con residuos agroindustriales merece especial atención dado su potencial para resolver dos problemas ambientales actuales de Ecuador y ofrecer una alternativa de aprovechamiento energético. Se recomienda avanzar y profundizar esta línea de investigación, poniendo énfasis en el ensayo de la co-gasificación con residuos agroindustriales disponibles ampliamente en Ecuador y prestando especial atención a los aspectos de seguridad de operación, ambientales y logística, los cuales podrían tener una significativa influencia sobre los costos y la viabilidad de implementación. También se recomienda avanzar en la búsqueda de una solución más amplia para el tratamiento de los residuos agroindustriales, algunos de los cuales ofrecen un interesante potencial de recuperación energética por vía termoquímica (material homogéneo con bajo nivel de humedad).

Con relación a los productos potenciales del proceso de gasificación, se presentan básicamente dos alternativas, la cogeneración de electricidad y calor y la producción de hidrocarburos líquidos. Se recomienda desarrollar mediciones que permitan cuantificar adecuadamente los parámetros de performance técnica y ambiental de dichas alternativas en base a un rango de materias primas compatible con los nichos identificados. Esta información, junto con datos de costos de los insumos involucrados y precios de mercado de los subproductos a obtener, debería permitir realizar una evaluación económica-financiera detallada de cada alternativa.

Finalmente, se recomienda realizar un estudio que caracterice más detalladamente los residuos generados y recolectados en Ecuador, especialmente los materiales no recuperables (e.g. plásticos no reciclables) provenientes de la planta de separación de Quito y de otras similares que se puedan llegar a implementar. En áreas rurales y de fincas, dado el alto contenido de materia orgánica y de humedad del RSU, se recomienda analizar las opciones de tratamiento biológicas (digestión aeróbica y anaeróbica), tanto centralizada como descentralizada.

1. Introducción

El crecimiento de la población y del ingreso per cápita, así como las modificaciones en los patrones de consumo, y la masificación y la obsolescencia de los bienes de consumo han incrementado la generación de residuos y han modificado la tipología de los mismos. Estos factores han agravado la problemática de los residuos sólidos urbanos durante las últimas décadas, requiriendo la implementación de sistemas de gestión y disposición final de los residuos que sean compatibles con políticas de respeto hacia el medio ambiente y de recuperación de materiales y energía.

En este contexto, Ecuador busca erradicar la existencia de botaderos y de sistemas de gestión de los residuos sólidos urbanos incompatibles con el marco legal existente. Existen diversas alternativas técnicas que pueden contribuir a este fin, siendo los rellenos sanitarios una de las opciones más habitualmente empleadas en América Latina.

Si bien existe significativa experiencia relacionada con la implementación exitosa de rellenos sanitarios, problemas relacionados con la disponibilidad de tierras aptas y con impactos ambientales negativos han promovido el estudio de alternativas, entre ellas la gasificación.

La gasificación de combustibles fósiles como el carbón mineral y de biomásas posee una extensa historia de desarrollo y utilización comercial. Sin embargo, por motivos relacionados con la materia prima utilizada, la gasificación de residuos sólidos urbanos es mucho más reciente y aún se encuentra en una etapa de despliegue comercial. Diversas ventajas comparativas la diferencian de los rellenos sanitarios y de la incineración, por lo cual se ha considerado relevante analizar en el presente estudio aspectos que hacen a la viabilidad de implementación del gasificador desarrollado por el INER para el tratamiento de los RSU de Ecuador.

El presente documento cubre aspectos relacionados con: la compatibilidad de la tecnología de gasificación con los RSU de Ecuador y los sistemas de manejo asociados, así como una identificación de otros residuos potencialmente gasificables (Sección 2); una caracterización general de la tecnología de gasificación y del piloto de gasificador de corriente ascendente desarrollado por el INER (Sección 3); una evaluación de aspectos que hacen a la viabilidad económica y financiera (Sección 4); una evaluación de aspectos que hacen a la viabilidad técnica (Sección 5); un análisis del marco legal e institucional, incluyendo los aspectos saliente de la normativa vigente y de las políticas y programas relevantes en curso (Sección 6); un análisis que integra todos los aspectos mencionados anteriormente indicando posibles barreras y estrategias (Sección 7); conclusiones y recomendaciones (Sección 8).

2. Caracterización de los RSU y los sistemas de manejo de los RSU en Ecuador

2.1 Los RSU en Ecuador

Una planificación adecuada del tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos requiere contar con información sobre la magnitud generada, la disponibilidad y la composición aproximada del residuo por tipo de material ya que la misma condiciona o limita la aplicación de determinados sistemas de manejo de residuos y tecnologías de tratamiento. En particular, tanto las vías de tratamiento biológicas como termoquímicas son “sensibles” a determinados materiales y sus características, por ejemplo, el poder calorífico, el contenido de materiales inertes, de humedad, de cenizas, o de compuestos tóxicos y peligrosos. Las rutas biológicas de conversión de residuos en general son más adecuadas para un residuo con alto contenido de materia orgánica húmeda, mientras que las rutas termoquímicas son preferibles ante residuos con elevado poder calorífico inferior (e.g. elevado contenido de plásticos y/o material orgánico con bajo contenido de humedad).

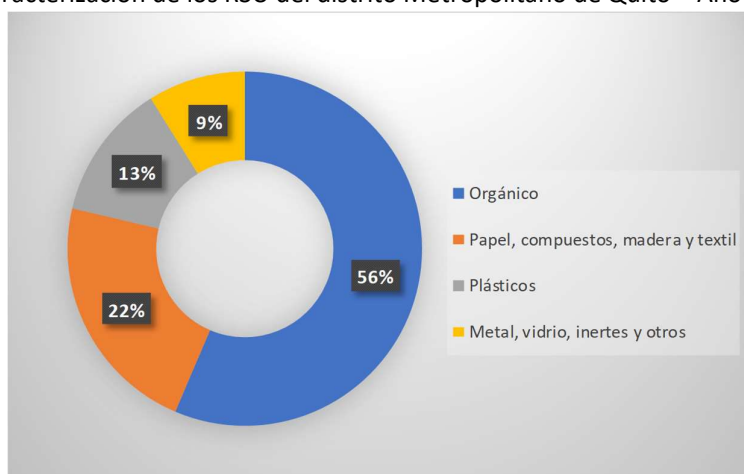
Adicionalmente, dado que la composición de los RSU suele variar en función del origen del residuo e incluso de la época del año, es deseable contar con información desagregada espacial y temporalmente.

En el caso de Ecuador, si bien no existe una caracterización muy detallada de los residuos para diversas zonas del país, se cuenta con algunos estudios que permiten identificar a grandes rasgos las características de los RSU en función del origen de los mismos.

Una de las caracterizaciones más detalladas y recientes de que se dispone se refiere al distrito Metropolitano de Quito (Pazmiño, 2012). Dicho estudio cuantifica la producción per cápita y la composición de los residuos del Área Metropolitana para los sectores doméstico, comercial, educativo, mercados y otros (Figura 2.1, Tabla 2.1). Los principales datos cuantitativos que se pueden extraer son:

- La producción per cápita de residuos es cercana a 0.85 kg/hab.día, siendo algo superior en el sector urbano del Cantón Quito (0.88 kg/hab.día) e inferior en el sector rural del Cantón (0.78 kg/hab.día).
- El sector doméstico es el principal generador de residuos, siendo responsable de 0.53 kg/hab.día (62%), seguido por el sector comercial (16%) y los mercados (14%)
- Los residuos orgánicos representan cerca del 56% del total de los RSU, mayormente constituidos por residuos de cocina. El porcentaje de orgánicos se eleva al 84% en el caso de los mercados
- Se citan cifras de materiales recuperados cercanas al 10%-13%. Los materiales potencialmente reciclables alcanzan el 24%. El porcentaje de materiales reciclables es mayor en las zonas con mayor nivel socioeconómico y en el sector educativo/institucional.

Figura 2.1. Caracterización de los RSU del distrito Metropolitano de Quito – Año 2012



Fuente: elaboración propia en base a (Pazmiño, 2012)

- El contenido de humedad promedio del RSU es cercano al 38% (compatible con un contenido de humedad en materia orgánica del 65%-70%).
- El PCI del RSU estaría en el rango 2,300-2,800 kcal/kg, influenciado principalmente por el elevado contenido de materia orgánica húmeda (56%) y el bajo contenido de plásticos (13%). Estas cifras deben ser confirmadas en base a un análisis más detallado del tipo de residuos generados y sus PCIs (e.g. fundas plásticas, materiales compuestos, electrónicos, menor a 1cm, otros). La separación de vidrio, metal, inertes y residuos peligrosos (3.6% en peso de los residuos) podría elevar levemente el PCI del RSU.
- Los residuos del sector educativo presentan el mayor contenido de materiales plásticos entre todos los sectores (22%) y por ende un mayor PCI que el resto de los sectores (3,600-3,900 kcal/kg).

Tabla 2.1. Caracterización de los RSU del distrito Metropolitano de Quito – Año 2012

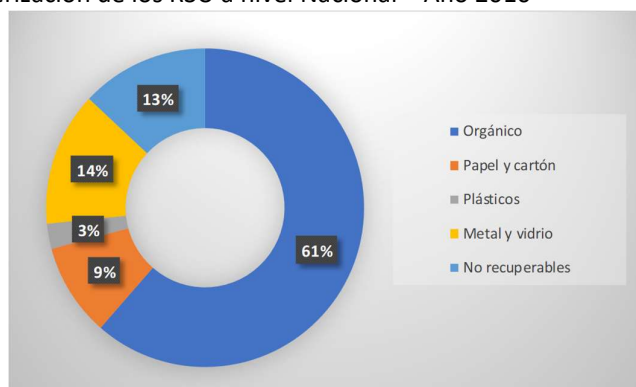
Material	Doméstico	Comercial	Educativo	Mercados	Otros	Total
Orgánicos de jardín	2.6%	1.1%	0.4%	0.0%	1.0%	1.8%
Orgánicos de cocina	51.4%	49.1%	24.4%	83.6%	50.8%	54.6%
Rechazos (papel higiénico)	12.6%	6.8%	9.7%	5.4%	8.6%	10.4%
Papel	5.3%	7.7%	14.4%	2.0%	7.7%	5.6%
Cartón	2.4%	5.2%	3.1%	2.8%	3.4%	3.0%
Compuestos	0.4%	0.2%	11.1%	0.0%	3.0%	0.8%
Madera, textiles, otros	2.8%	2.7%	4.9%	0.1%	2.8%	2.5%
Botellas PET	1.7%	2.8%	4.1%	1.3%	2.6%	1.9%
Plásticos alta densidad	2.1%	2.1%	4.2%	1.0%	2.4%	2.0%
Fundas plásticas	5.5%	9.7%	5.2%	3.9%	6.1%	6.0%
Polipropileno	1.5%	2.5%	5.4%	0.0%	2.5%	1.7%
Poliestireno	0.7%	1.4%	2.9%	0.0%	1.3%	0.8%
Metalicos	1.0%	0.8%	1.4%	0.0%	0.9%	0.9%
Vidrio	2.5%	1.7%	4.1%	0.0%	2.2%	2.1%
Inertes (losa, cerámica)	0.6%	0.1%	0.4%	0.0%	0.3%	0.4%
Peligrosos (pilas, baterías)	0.3%	0.2%	0.0%	0.0%	0.2%	0.2%
Electrónicos	0.2%	0.2%	0.1%	0.0%	0.1%	0.2%
Menor a 1cm	6.2%	5.8%	4.2%	0.0%	4.2%	5.1%
Subtotal orgánico	53.9%	50.1%	24.8%	83.6%	51.8%	56.4%
Subtotal papel, cartón, madera, textil, compuestos	23.5%	22.6%	43.3%	10.2%	25.5%	22.2%
Subtotal plásticos	11.6%	18.5%	21.8%	6.1%	14.9%	12.4%
Subtotal vidrio, metal, inertes, peligrosos	4.5%	2.8%	5.9%	0.0%	3.5%	3.6%
Otros (electrónicos, menor a 1cm)	6.4%	6.0%	4.2%	0.0%	4.3%	5.3%
Total	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
PPC (kg/hab.día)	0.53	0.14	0.03	0.12	0.05	0.85
Estructura por sector (%)	61.8%	15.9%	3.0%	13.7%	5.6%	100.0%
PCI resultante (kcal/kg)	2,768	3,301	3,863	1,937	3,007	2,785

Fuente: Fuente: elaboración propia en base a (Pazmiño, 2012)

A nivel Nacional se posee información proveniente de la base de datos del Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (Figura 2.2) (PNGIDS, 2017). Los principales datos relevantes para el presente documento son:

- La generación de RSU promedio a nivel nacional sería de 0.77 kg/hab.día, con un amplio rango entre 0.12 kg/hab.día (GADM Colta) y 1.19 kg/hab.día (GADM Guayaquil) (Figura 2.3 y 2.4).
- Probablemente parte de la diferencia en las cifras de generación per cápita pueda explicarse por la cobertura de la recolección, la cual varía entre 98.5% en el cantón Santa Cruz (Galápagos) hasta 5.9% en el cantón Taisha (Morona Santiago)
- La generación per cápita de Quito sería 0.90 kg/hab.día, consistente con (Pazmiño, 2012)

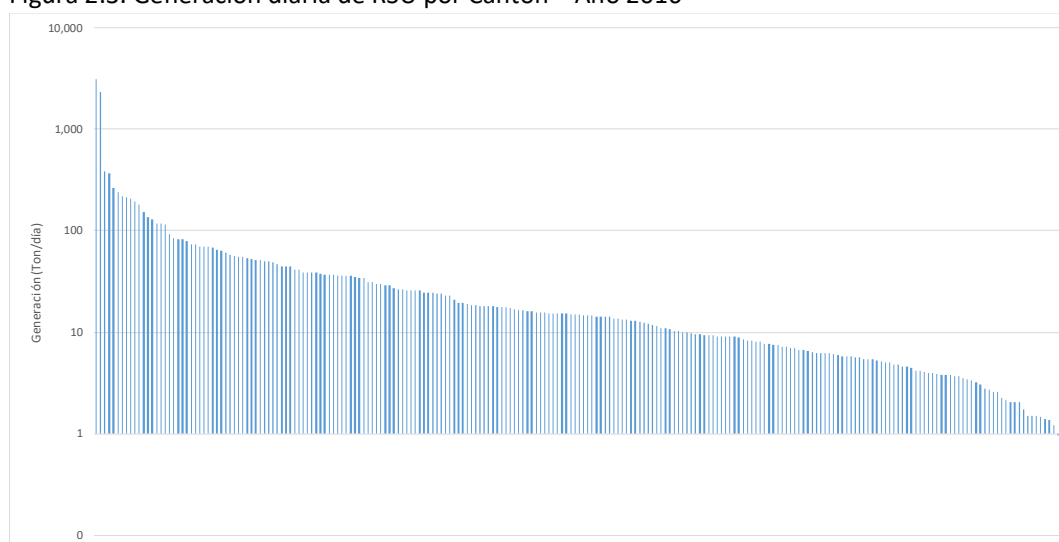
Figura 2.2. Caracterización de los RSU a nivel Nacional – Año 2010



Fuente: elaboración propia en base a (PNGIDS, 2017)

- El porcentaje de material orgánico es cercano al 61%, algo superior al que se estimó para el Distrito Metropolitano de Quito, como sería de esperar. El porcentaje de plásticos es inferior al de Quito, situándose cerca del 3%.
- Como consecuencia de la estructura por tipo de material el PCI promedio del RSU a nivel Nacional es sustancialmente inferior al estimado para Quito (promedio nacional en el rango 1,200-1,700 kcal/kg) y el contenido de humedad es algo superior (>38%). Estas cifras deben ser confirmadas en base a un análisis más detallado del tipo de residuos generados y sus PCIs (e.g. caracterización de plásticos y materiales no recuperables).

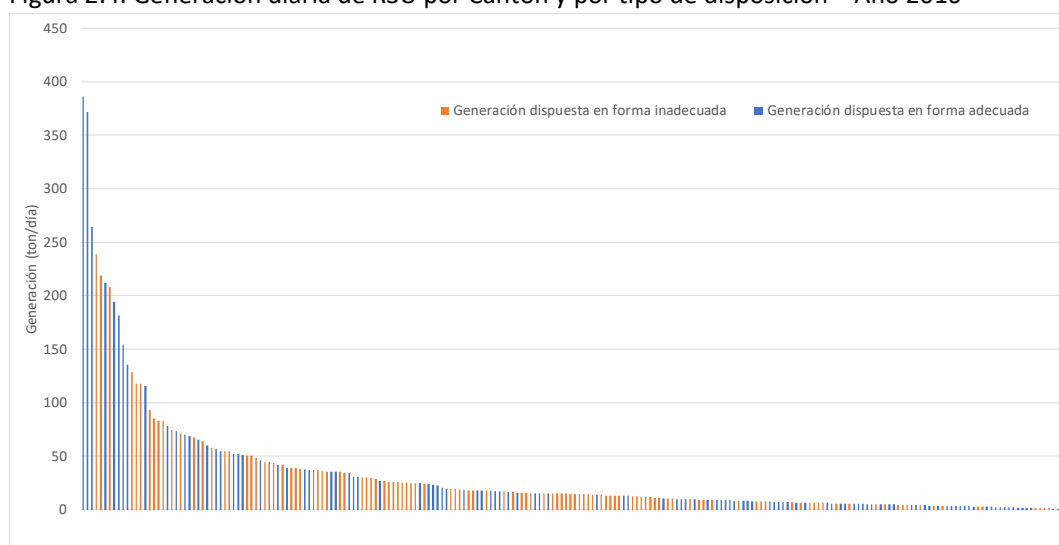
Figura 2.3. Generación diaria de RSU por Cantón – Año 2016



Fuente: elaboración propia en base a (PNGIDS, 2017)

Nota: escala logarítmica

Figura 2.4. Generación diaria de RSU por Cantón y por tipo de disposición – Año 2016

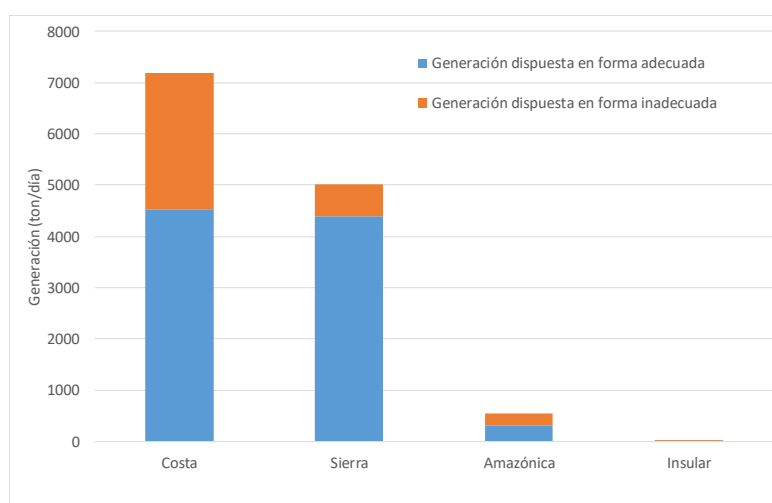


Fuente: elaboración propia en base a (PNGIDS, 2017)

Nota: se excluyen los cantones de Quito y Guayaquil por razones de escala

- El promedio de generación de residuos de los 224 cantones es de 57 ton/día. El 28% de los residuos generados se dispone en forma inadecuada (3,500 ton/día).
- El 92% de los cantones tiene una generación diaria de RSU inferior a las 100 ton/día, con un promedio de 20 ton/día. El 59% de la generación de residuos de estos cantones se dispone en forma inadecuada (aproximadamente 2,500 ton/día).
- El 50% de los cantones tiene una generación de residuos inferior a 15 ton/día, con un promedio de 5 ton/día. El 54% de la generación de residuos de estos cantones se dispone en forma inadecuada (aproximadamente 430 ton/día).

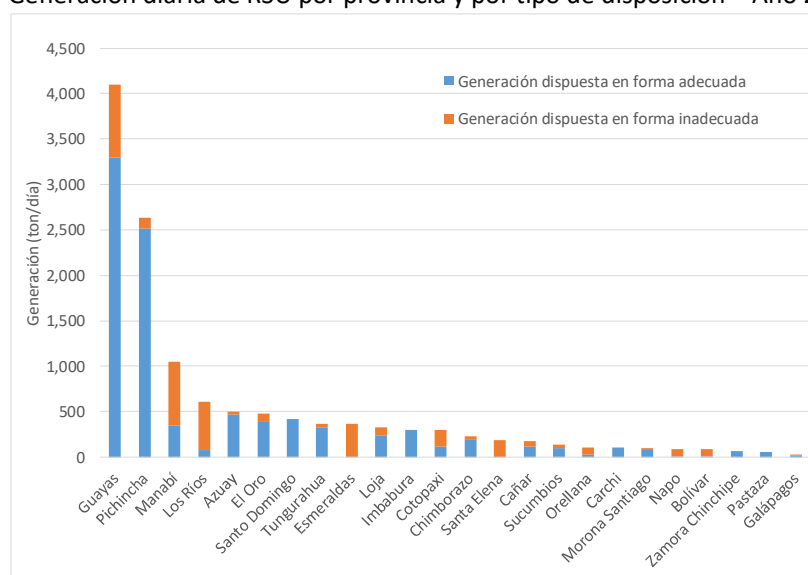
Figura 2.5. Generación diaria de RSU por región y por tipo de disposición – Año 2016



Fuente: elaboración propia en base a (PNGIDS, 2017)

- Las regiones Costa y Sierra concentran más del 95% de la generación de residuos y el 93% de los residuos dispuestos en forma inadecuada a nivel Nacional (Figura 2.5).
- La región Costa genera el 53% de los residuos y cuenta con el porcentaje más elevado de residuos dispuestos en forma inadecuada entre todas las regiones (21% del total de residuos generados a nivel Nacional)

Figura 2.6. Generación diaria de RSU por provincia y por tipo de disposición – Año 2016



Fuente: elaboración propia en base a (PNGIDS, 2017)

- Las provincias de Guayas, Manabí, Los Ríos y Esmeraldas (región Costa) generan el mayor volumen de residuos tratados en forma inadecuada a nivel Nacional (Figura 2.6). Estas tres últimas provincias poseen una elevada proporción de residuos tratados en forma inadecuada respecto del total provincial (>67%).

2.2 Modelo actual de manejo de los RSU en Ecuador

Según el Código Orgánico de Organización Territorial (COOTAD), en Ecuador los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM) son los responsables del manejo de los desechos sólidos generados en su jurisdicción. También se indica en dicho código que “Los gobiernos autónomos descentralizados municipales establecerán, en forma progresiva, sistemas de gestión integral de desechos, a fin de eliminar los vertidos contaminantes en ríos, lagos, lagunas, quebradas, esteros o mar, aguas residuales provenientes de redes de alcantarillado, público o privado, así como eliminar el vertido en redes de alcantarillado.” (COOTAD, 2012).

Para lograr este fin, y con el objetivo de desarrollar las capacidades necesarias en cada Municipio, el Gobierno Nacional de Ecuador viene implementando desde el año 2010 a través del Ministerio del Ambiente el Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (PNGIDS).

A continuación, se citan textualmente algunos de los objetivos y metas de dicho programa (MAE, 2015).

Objetivos:

- “Promover un modelo de gestión integral y sostenible de los residuos sólidos que se generan en los 221 GADM del país, en las etapas de separación en la fuente, recolección, transporte, aprovechamiento de los residuos, tratamiento y disposición final, a fin de potenciar el reciclaje en el país.
- Diseñar e implementar una política de Gestión Integral de Residuos Sólidos.
- Diseñar e implementar un Modelo Estandarizado de Gestión Integral de Residuos Sólidos en base a parámetros geográficos, poblacionales, generación y caracterización de los residuos sólidos.
- Gestionar los insumos técnicos necesarios para incrementar la calidad de los servicios de aseo (recolección y barrido), potenciar la recuperación de materiales reciclables, fomentar el aprovechamiento de residuos tanto para reciclaje como para transformación energética, garantizar una adecuada disposición final y tratamiento técnico de lixiviados y dar a conocer este trabajo a la población para que se sume al cambio, mediante un consumo responsable.
- Impulsar la industria nacional de reciclaje y aprovechamiento energético, con el fin de aportar al cambio de la matriz productiva.
- Implementar políticas para la adecuada gestión integral de desechos peligrosos y especiales, aplicando el principio de Responsabilidad Extendida del Productor/Importador, potenciando el reciclaje sustentable.”

Metas al año 2017:

- “Eliminar todos los botaderos a cielo abierto de los municipios del país.
- Socializar la metodología para el diseño de la política pública con todos los actores relacionados a la generación y al manejo de los desechos sólidos en el país.
- Diseñar e implementar la Política Pública del correcto manejo de los desechos sólidos en el Ecuador.
- Impulsar el reciclaje sustentable, que aporte al cambio de la matriz productiva.
- Apoyar a los recicladores de base para que su trabajo se encuentre enmarcado en los principios de inclusión económica y social, se desarrolle en un ambiente seguro y puedan mejorar su calidad de vida.
- Comunicar el trabajo realizado y apoyar en la educación de la ciudadanía para que maneje adecuadamente sus desechos desde la generación inicial.”

Las principales áreas temáticas desarrolladas por el MAE para cumplir con los objetivos planteados son (MAE, 2015):

- “Modelos de Gestión Integral de Desechos Sólidos: se pretende estandarizar el modelo de gestión de residuos sólidos de acuerdo a las características ambientales y sociales de cada cantón, por lo que se ha dividido el país en cuatro módulos (cantones grandes,

medianos, pequeños y micros). En cada cantón se trabajará en la consolidación y fortalecimiento de los diferentes procesos, como: generación, recolección, transporte, acopio/transferencia y disposición final. Mediante la implementación de modelos de gestión integral se pretende fortalecer la gestión de servicios de aseo, con el fin de precautelar el cuidado y preservación del ambiente.

- Agregación de Valor: Se pretende impulsar procesos de agregación de valor de los residuos sólidos urbanos que se generan en el país. Aproximadamente el 60% de los residuos que se producen diariamente corresponden a residuos orgánicos y 20% a residuos sólidos inorgánicos potencialmente reciclables. El MAEPNGIDS, pretende implementar procesos de agregación de valor en base a los siguientes lineamientos:
 - W2E (Waste to Energy): Aprovechamiento energético mediante la implementación de procesos de transformación del potencial calorífico de los residuos. Debido a la gran cantidad de residuos orgánicos generados diariamente, se pretende impulsar el aprovechamiento del potencial calorífico de la misma, mediante la transformación de metano a energía eléctrica y/o calórica.
 - Reciclaje: mediante la implementación de procesos de clasificación en la fuente y separación mecánica en estaciones de transferencia, se pretende fortalecer la recolección de residuos sólidos reciclables con potencial comercial para reciclaje.”

Finalmente, el PNGIDS contempla las siguientes componentes para cumplir con las metas propuestas (MAE, 2015):

- “Política: El MAEPNGIDS pretende incidir en el manejo de Desechos Sólidos a nivel país a través del desarrollo de una Política de Gestión Integral de Residuos sólidos.
- Técnica: Uno de los ejes de gestión del MAEPNGIDS es el fortalecimiento de capacidades técnicas y operativas de los GADM en el manejo de los desechos sólidos.
- Participación: Para la aplicación del modelo de Gestión Integral de desechos sólidos es prioritario el involucramiento activo de la sociedad civil.
- Inclusión económica y social: En Ecuador existen aproximadamente 20.000 recicladores, grupo altamente vulnerable que ha venido realizando las labores de recolección de residuos reciclables de manera informal, el programa pretende gestionar la inclusión social y económica de este grupo dentro de la cadena de valor de los residuos.
- Optimización de servicios: Garantizar la calidad y la frecuencia en los servicios de recolección, transporte, aprovechamiento, tratamiento y disposición final de los desechos sólidos.
- Responsabilidad y corresponsabilidad: Extendida del productor y producción limpia.
- Control, seguimiento y Monitoreo”

Los objetivos y metas planteadas por el PNGIDS son, en principio, compatibles con el desarrollo e implementación de la tecnología de gasificación, la cual podría contribuir principalmente a la eliminación de botaderos y al aprovechamiento energético de los residuos. Dicha compatibilidad está sujeta al cumplimiento de los estándares ambientales establecidos por la regulación por parte de los procesos de recuperación de energía. Resta por ver la posible interacción entre los objetivos de reciclaje y la implementación de tecnologías Waste to Energy de tipo termoquímica como la gasificación, ya que algunos materiales como los plásticos podrían ser determinantes

para garantizar la viabilidad de estos procesos. Para ello es necesario contar con información referida al volumen y tipo específico de materiales generados (particularmente tipos de plásticos) que son objetivo de un programa de reciclaje en el marco del PNGIDS. Es necesario destacar aquí que la gasificación de RSU no necesariamente es incompatible con la recuperación de materiales reciclables, tal como lo demuestra la experiencia internacional en este sentido. Uno de los aspectos clave en este sentido es el volumen de plásticos no reciclables generado en Ecuador.

2.3 Contenido energético de los RSU e iniciativas de recuperación de energía

El perfil de residuos deseable para su tratamiento en un gasificador es aquel con un alto poder calorífico y con un bajo requerimiento de pretratamiento (e.g. residuo seco con características homogéneas). Desde este punto de vista, la utilización de RSU como materia prima para gasificación presenta desafíos especiales por la variabilidad del recurso (por barrio/municipio y a lo largo del año) y por su alto contenido de humedad, particularmente en América Latina y El Caribe. En el contexto de los RSU se busca por tanto utilizar un residuo con bajo contenido de humedad (menor fracción de residuos biodegradables húmedos) y con bajo contenido de inertes (e.g. vidrio, metales, algunos residuos de construcción). Ello se puede lograr mediante selección del origen de los residuos (tipo de generador, domiciliario o comercial) o mediante etapas de separación (en origen y/o en planta de transferencia) y pretratamiento. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que si la fracción biodegradable es separada y se destina a relleno sanitario, no se reducen las emisiones GEI respecto de la situación de base y las ventajas del sistema de tratamiento con gasificador se restringen a la reducción del volumen que ingresa al relleno sanitario y a la recuperación de energía.

Si bien no se puede establecer en forma generalizada un poder calorífico inferior umbral del residuo por debajo del cual no resultaría viable el proceso de gasificación, sí puede afirmarse que a medida que baja el PCI es necesario apelar a la utilización de un combustible externo o a la co-gasificación con otro residuo de alto PCI y bajo contenido de humedad para poder sostener rendimientos aceptables. En todo caso, son necesarias mediciones concretas sobre un gasificador determinado para poder establecer este nivel umbral. Como referencia, en el caso de la gasificación por arco de plasma (Hervin, 2013) cita un umbral de 2,300 kcal/kg de residuo por debajo del cual el consumo de diesel oil se incrementaría más allá del mínimo deseable para poder mantener una generación eléctrica estable.

Con relación a la energía contenida en los residuos de Ecuador, estimando un PCI promedio que varía entre 2,800 kcal/kg de residuo (ciudades grandes) y 1,700 kcal/kg de residuo (resto de las ciudades) se obtiene un contenido energético total en el residuo generado cercano a 37 GWh/día para Ecuador¹. El 26% de esta cifra corresponde a Guayaquil y el 19% a Quito. Los valores por GADM varían entre 2 MWh/día para los GADM más pequeños y 10,000 MWh/día para el GADM más grande, con una distribución similar a la presentada en la Figura 2.3 (generación diaria de residuos por Cantón). La posibilidad de gasificar adecuadamente estos residuos en el gasificador desarrollado por el INER sin apelar a combustibles adicionales debe

¹ La diferencia con el valor consignado en (Narváez, 2013) se debe principalmente al PCI considerado para el residuo orgánico, 4260 kcal/kg contra 1200 kcal/kg.

ser confirmada en la práctica, pero en base al análisis del estado del arte de esta tecnología se considera poco factible en el caso del residuo promedio disponible a nivel nacional.

Al considerarse el potencial de generación de electricidad en base a tecnologías de conversión termoquímicas (incineración y gasificación) debe tenerse en cuenta que la central debe instalarse muy cerca de donde se genera el residuo y por lo tanto la potencia de la misma guardará relación con el volumen de residuo generado diariamente ya que no es factible el transporte por largas distancias ni su almacenamiento prolongado. Teniendo en cuenta que habitualmente se utiliza un ciclo de vapor la eficiencia del proceso en general se reduce a medida que baja la potencia, esto implica que los GAD de mayor tamaño podrían acceder a mayores rendimientos y menores costos. Al margen de este aspecto, hay otras consideraciones que pueden reducir la viabilidad del aprovechamiento energético concreto de algunos residuos mediante la tecnología de gasificación, siendo uno de ellos el PCI del residuo.

Para la conversión de la biomasa en electricidad, los gasificadores de baja potencia (<1MWe) registran eficiencias que dependen entre otros aspectos de la escala, la materia prima, y la tecnología específica de conversión. Valores típicos de eficiencia para generación de electricidad en base a un motor de combustión interna, biomasa seca como materia prima y aire como agente oxidante se sitúan en el rango 13%-23%, y en base a turbogas 20%-30% (Bocci, 2014) (Asadullah, 2014) (Maya, 2016). Debe asumirse que la conversión de RSU con las características presentes en Ecuador en electricidad utilizando gasificación tendrá eficiencias menores a las correspondientes a biomasa seca (<20% de humedad) ya que parte de la energía se invertirá en el secado parcial de la biomasa. En base a una generación neta de 750 kWh/ton de residuo para un gasificador de RSU se puede estimar una eficiencia del 19% (RSU con 3,500 kcal/kg) (Tan, 2013). Asumiendo una eficiencia del 17% (algo menor a la anterior por menor PCI, mayor contenido de humedad y baja potencia) se estima un potencial teórico de generación eléctrica en base a gasificación de RSU cercano a 6 GWh/día para Ecuador². La realización de este potencial está supeditada a la factibilidad de utilizar el RSU promedio de Ecuador para gasificación sin necesidad de utilizar combustibles adicionales. En caso de que ello no fuera posible, deberá sustraerse de este potencial la energía necesaria para suplementar el bajo poder calorífico del residuo.

Se han desarrollado en Ecuador algunas iniciativas de recuperación de energía de RSU y de gasificación entre las cuales se pueden mencionar la recuperación de energía del relleno sanitario de la ciudad de Cuenca y el gasificador experimental para biomasa instalado en el INIAP.

Con respecto a la primera de las iniciativas, se trata de una planta ubicada en Pichacay, la cual inyecta su generación al sistema interconectado. La generación se realiza utilizando el metano proveniente del relleno sanitario de la Ciudad de Cuenca, el cual recibe cerca de 400 t/día de residuos. La potencia bruta instalada es de 2 motogeneradores de 1 MWe cada uno. Se estima que el caudal de biogás producido en el año 2014 fue de 990 m³/h de biogás con un contenido de metano del 50%, en base al cual se podrían exportar a la red 13,142 MWh/año. En base a estos datos se estima una eficiencia neta de generación eléctrica cercana al 13%. El proyecto contempla la venta de certificados de carbono y accede a una tarifa preferencial de venta de

² Cifra inferior a la mitad de la estimada en (Narváez, 2013).

electricidad cercana a 0.11 USD/kWh (Garay, 2014). Como referencia se puede indicar que el precio medio de la energía vendida en el año 2016 fue de 0.043 USD/kWh para generación y de 0.055 USD/kWh para autogeneradores (ARCONEL, 2017). La operación corresponde a la empresa mixta EMAC-BGP ENERGY constituida por la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) y BGP ENGINEERS de Holanda (EBE, 2014).

La segunda de las iniciativas fue la que dio lugar al proyecto para cogasificar residuos sólidos urbanos. Se trata de un gasificador desarrollado entre los años 2007 y 2009 por la Corporación para la Investigación Energética para el Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) con un financiamiento parcial de SENACYT. La planta está instalada en La Concordia, en el predio del INIAP, Estación Experimental de Santo Domingo.

La planta se destina a estudiar el proceso de gasificación de biomasa y la producción de electricidad en base al gas de síntesis e incluye una planta de carbonización de biomasa. El gasificador alimenta un motor de combustión interna acoplado a un generador eléctrico que puede producir hasta 30 kVA. Algunas de las biomásas estudiadas son: cuesco de palma africana, cascarilla de arroz, concha de macadamia y chips de bambú. Asimismo, se está investigando la posibilidad de utilizar gas de síntesis para producir fertilizantes agrícolas (urea) (CIE, 2017a).

En el año 2012 esta planta fue repotenciada para asegurar las condiciones de operación y parámetros necesarios para la obtención del gas de síntesis y se desarrollaron los siguientes estudios complementarios: determinación de los parámetros de operación para la formación de gas de síntesis a partir de cuesco de palma africana y cascarilla de arroz, su composición química, el rendimiento para generación eléctrica y la viabilidad de uso del gas de síntesis para la producción de compuestos químicos de interés industrial (CIE, 2017b).

Sería sumamente importante para cualquier evaluación de viabilidad de esta tecnología contar con los estudios desarrollados por la CIE en el gasificador de La Concordia.

Por último, la CIE cuenta con un proyecto para el desarrollo del proceso de gasificación de residuos sólidos urbanos por arco de plasma (CIE, 2010). A nivel internacional esta tecnología está mucho menos desarrollada que la gasificación convencional pero presenta algunas ventajas sobre la misma, tales como la capacidad de procesar todo tipo de materiales y la producción de un residuo sólido vitrificado. La propuesta de la CIE apunta al tratamiento de los residuos sólidos de la ciudad de Quito, incluyendo los residuos hospitalarios, y la generación eléctrica con el gas de síntesis resultante.

2.4 Separación, reciclado y recuperación de materiales

Las operaciones de reciclado de materiales deben tenerse en cuenta cuando se está considerando instalar una planta de gasificación de RSU ya que pueden influir tanto sobre el dimensionamiento del gasificador como sobre la composición y PCI del material a gasificar y por ende sobre la viabilidad del emprendimiento. Se trata por tanto de identificar el tipo de materiales que son actualmente recuperados o que serán potencialmente recuperados mediante programas específicos (PNGIDS) y cómo podría afectar esto el potencial para gasificación.

En particular, interesa cuantificar los materiales que son o podrían ser objeto de iniciativas de recuperación formales o informales y que poseen un elevado PCI, tal como es el caso de algunos plásticos reciclables, cartón y papel. Por otra parte, la recuperación de otros materiales como los metales y el vidrio pueden contribuir positivamente a los procesos termoquímicos de tratamiento de residuos ya que dichos materiales inertes representan un problema para el proceso.

Por estas razones, resulta pertinente estudiar el estado actual de las iniciativas de recuperación de materiales en Ecuador y lo que podría suceder en esta temática hacia el futuro teniendo en cuenta el marco legal y regulatorio del país y las políticas existentes en esta materia.

El PNGIDS pone especial énfasis en el reciclado de materiales, tanto mediante clasificación en la fuente como separación mecánica en estaciones de transferencia. También se reconoce la existencia de 20,000 recicladores y la importancia de incluir económica y socialmente a estos trabajadores informales. Estos trabajadores son responsables por la recuperación de la mayor parte de los materiales reciclables, los que en el año 2012 alcanzaron unas 70,556 toneladas (6.75% de los residuos inorgánicos y 1.7% de los residuos generados totales) (MAE, 2015).

Los principales materiales buscados por los recicladores son papel, cartón, plástico y PET, vidrio y ferrosos y no ferrosos. Como ejemplo detallado del tipo de materiales reciclables se listan aquellos que compra la Empresa reciclar de Ecuador (Reciclar, 2017):

- Plásticos de baja densidad
- Plásticos de alta densidad
- Plásticos de línea hogar
- Plástico PET
- Envases plásticos
- Bajas de inventarios de plásticos
- Pallets plásticos
- Archivos
- Revistas
- Libros
- Cuadernos
- Periódico
- Guías telefónicas
- Papel copiadora
- Refile de imprentas
- Papel Bond
- Papel Couché
- Papel químico
- Cajas usadas
- Retazos de cartón
- Cartón en desuso
- Bajas de inventarios
- Residuos de cartoneras
- Tubos de cartón
- Cobre
- Bronce
- Aluminio
- Chatarra de hierro

- Radiadores
- Perfiles de ventanas
- Cables de metal
- Artículos en desuso
- Otros metales

Con respecto a las iniciativas de separación, el PNGIDS informa la entrega de 22 equipos de compactación a diferentes GAD para la reducción del volumen de cartón, papel y PET. Existe además una iniciativa de recuperación de envases PET de embotelladores y a partir de centros de acopio y recicladores. En el año 2012 se lograron recuperar 1,136 millones de botellas de un total de 1,406 millones producido (80%).

Con relación a las operaciones de separación mecánica se pueden listar las siguientes iniciativas:

- Planta de separación de residuos El Troje (planta de transferencia sur de Quito). En operación. Se han manifestado algunos problemas operativos que resultan en operación parcial. Se ha realizado una licitación para el mejoramiento de esta planta.
- Licitación para el diseño, construcción y operación de una planta de clasificación de residuos para la planta de transferencia norte de Quito (Zámbiza).
- Planta de tratamiento de residuos de Imbabura (Carchi). Planificada
- Estudio de pre factibilidad y factibilidad para una planta de separación de residuos sólidos para el cantón de Cuenca.

Las plantas de separación pueden ser una ubicación posible para una iniciativa de gasificación de parte de la fracción no recuperada de los residuos sólidos urbanos. Para estimar la viabilidad de esta iniciativa es necesario analizar la composición y volumen del material separado pero no reciclado.

2.5 Potencial impacto del reciclado sobre las iniciativas de recuperación de energía

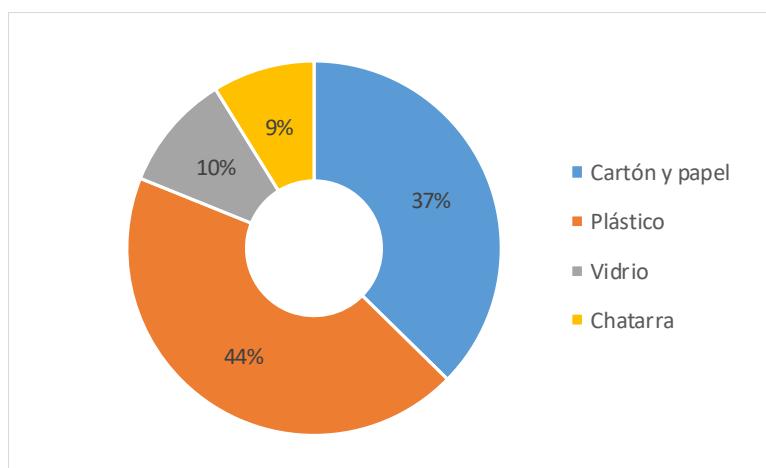
Los materiales recuperables con mayor valor de mercado en Ecuador son: plástico rígido, LDPE, PET, papel y cartón, metales. En particular, los tres primeros (plásticos) presentan un elevado PCI y su separación de la corriente de residuos reduce el PCI promedio de los mismos y por ende repercute negativamente sobre los aspectos económico-financieros de un proceso de recuperación de energía en base a gasificación. Algo similar sucede con el papel y cartón, aunque en este caso el PCI es menor.

En base a la caracterización de los RSU de la ciudad de Quito (Pazmiño, 2012) se puede estimar el impacto potencial que podría tener sobre el peso y el PCI del residuo la separación de estos materiales. Para la ciudad de Quito la separación del 100% de los plásticos (PET, plásticos de alta densidad, polipropileno, poliestireno, fundas plásticas), papel, cartón y metales significaría una reducción del peso de los residuos cercana al 22% (de 1,990 ton/día en el año 2012 a 1,560 ton/día) en tanto que el PCI se reduciría de 2,800 kcal/kg a 1,700 kcal/kg. La recuperación del 50% de estos materiales llevaría el PCI de 2,800 kcal/kg a cerca de 2,300 kcal/kg, en tanto que la recuperación de todo el PET conduciría a un PCI cercano a 2,700 kcal/kg. A todos estos valores

se debe aplicar el rango de incertidumbre en el cálculo del PCI estimado en la sección correspondiente.

(MAE, 2015) indica que la cantidad de residuos inorgánicos recuperados en el año 2012 fue de 70,556 toneladas (6.75% de los residuos inorgánicos y 1.7% de los residuos generados totales), y define una meta de 533,623 toneladas (40% de los residuos inorgánicos y 10% de los residuos generados totales) de residuos en el año 2017. La mayor parte de los residuos inorgánicos recuperados en el año 2012 fueron captados por los recicladores informales. La figura 2.7 presenta la estructura de materiales recuperados por tipo de material.

Figura 2.7. Estructura de materiales recuperados en operaciones de reciclaje



Fuente: elaboración propia en base a (MAE, 2015)

Las cifras estimadas para el año 2017 dan a entender que existiría una fracción de los residuos inorgánicos (que como máximo es del 60%, 800,000 t/año, 15% de los residuos totales generados) que podría ser aprovechada con fines energéticos. Esta fracción del 60% probablemente incluya diversos materiales (papel, cartón, plásticos, vidrio, metales). Asumiendo una estructura similar a la de los materiales recuperados para reciclaje (Figura 2.7), se puede estimar que de las 800,000 t unas 350,000 t podrían corresponder a plásticos y unas 300,000 t a cartón y papel. Teniendo en cuenta el PCI de cada uno de estos materiales se puede estimar que la cantidad de residuos orgánicos que se podría gasificar con los plásticos, papel y cartón sería cercana a 800,000 de toneladas/año, de tal forma que el PCI promedio de la mezcla sea cercano a 3,500 kcal/kg. Esto representa cerca del 20% de los residuos orgánicos generados en Ecuador por año. Es probable que esta estimación deba acotarse a las grandes ciudades dado que los residuos en áreas rurales y pequeñas ciudades contienen una mayor proporción de orgánicos.

2.6 Residuos agroindustriales potencialmente gasificables

Dado el elevado contenido de materia orgánica y de humedad de los RSU de Ecuador resulta interesante investigar otras fuentes de residuos que puedan ser co-gasificados junto al RSU³. En esta categoría se incluyen algunos residuos agroindustriales y foresto-industriales que cumplan con algunos requisitos como ser:

- Bajo contenido de humedad y elevado PCI
- Elevado volumen de residuos generado en Ecuador y buena disponibilidad a costo cercano a cero
- Residuos que no posean usos alternativos significativos (actuales o potenciales) y cuya disposición final represente un problema
- Residuos que estén disponibles en forma concentrada (planta industrial) y cercanos a alguna Municipalidad

En la Tabla 2.2 se listan algunos residuos agroindustriales disponibles en Ecuador que podrían llegar a utilizarse para gasificación. Entre estos residuos se pueden destacar la cascarilla de arroz y los residuos de la extracción del aceite de palma, tanto el cuesco de palma como la fibra de palma. Estos tres residuos poseen un elevado PCI, se encuentran disponibles en forma abundante en algunas provincias de Ecuador (ver Figura 2.8), y estarían generando algunos problemas de disposición inadecuada.

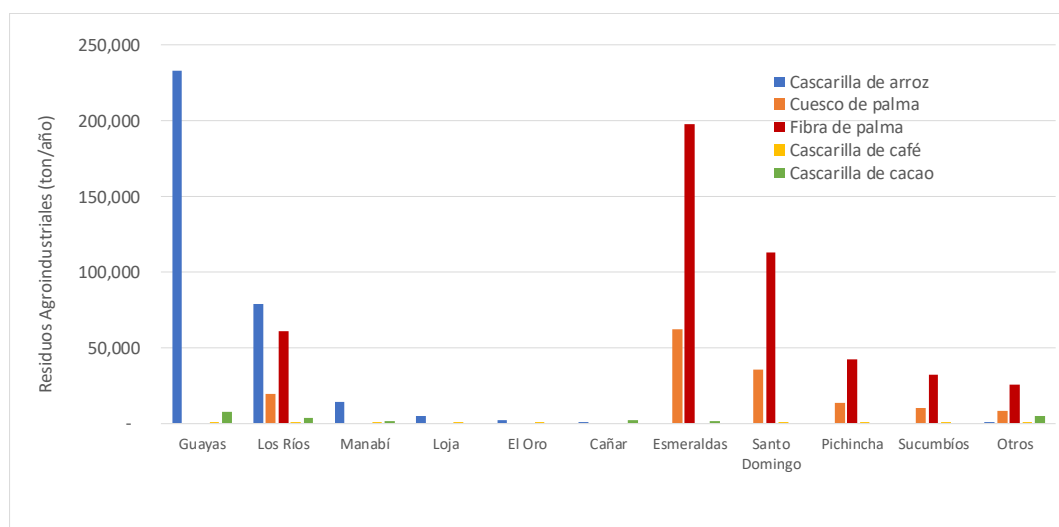
Tabla 2.2. Características de algunos residuos agroindustriales de Ecuador potencialmente gasificables

Residuo	Humedad (%)	PCI (kcal/kg)	Producción de residuo (ton/año)	Grado de concentración del residuo - Fuente	Destino actual
Cascarilla de arroz	7.4%	3,573	333,484	Medio - 1,460 Piladoras	Secado de granos, disposición en cursos de agua, quemado al aire libre
Cuesco de palma	12.0%	4,780	148,974	Alto - 40 Plantas extractoras de aceite de palma	Sin uso definido. Agregado y cobertura para suelo
Fibra de palma		4,111	471,752		Calor de proceso en algunas plantas extractoras (combustión)
Cáscara de cacao	5-15%	3,466	21,392	Planta procesadora	Alimento animal
Cascarilla de café	6.3%	3,227	475	Planta procesadora	Abono en campo cafetal, si está cerca de la fábrica. Alimento animal
Cáscara de coco	8.0%	4,302	?	Planta procesadora	

Fuente: elaboración propia en base a SIPA (2017).

Figura 2.8. Generación anual de residuos agroindustriales seleccionados por provincia – Año 2013

³ Se estima que el contenido de humedad del RSU adecuado para gasificar debe ser inferior al 25% (Dong, 2016), lo que implica que para RSU con elevado contenido de humedad como el de Ecuador parte de la energía del proceso deberá ser invertida en una etapa de secado con la consiguiente reducción en la eficiencia del proceso. El hecho de que el INER haya decidido co-gasificar RSU con cuesco de palma parece corroborar esta hipótesis.



Fuente: elaboración propia en base a (SIPA, 2017)

Una mezcla de 50% de materia orgánica con 70% de humedad (1,200 kcal/kg) y 50% de cuesco de palma (4,780 kcal/kg) daría como resultado una materia prima para gasificar con un PCI cercano a 3,000 kcal/kg. Un similar poder calorífico inferior podría obtenerse con una mezcla de 70% de materia orgánica y 30% de plásticos. Debe tenerse en cuenta que el contenido de plásticos estimado para el RSU de Ecuador es sustancialmente inferior a esta cifra, siendo cercano al 13% para el cantón Quito y 2.6% para el promedio país.

El cuesco y la fibra de palma poseen los más elevados PCI entre los residuos identificados y son generados en forma muy concentrada en unas 40 plantas extractoras (Figura 2.9). Las plantas extractoras en general deben estar cerca de los cultivos para reducir el costo de transporte y garantizar la obtención de un aceite de calidad, de tal forma que su distribución espacial está asociada a las plantaciones de palma.

En base a la información geo-referenciada de las plantas industriales donde se generan los residuos del procesamiento de la palma (cuesco y fibra) y de los botaderos y rellenos sanitarios se pueden identificar las Municipalidades que son cercanas a alguna de estas plantas y que eventualmente podrían tener algún potencial de co-gasificación de RSU con residuos agroindustriales (Figura 2.9).

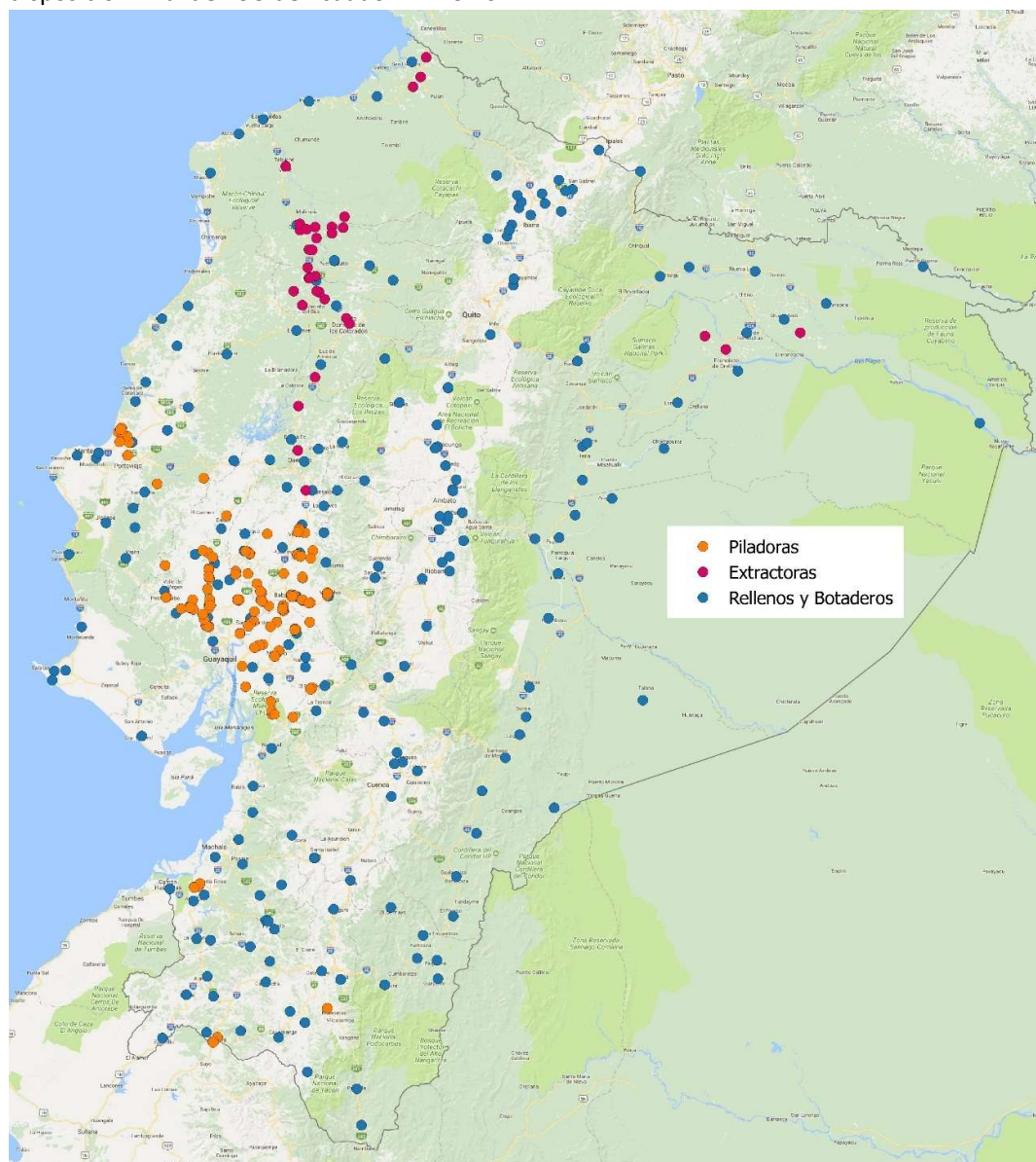
La mayor parte de las plantas extractoras de aceite se encuentra entre Quinindé y Santo Domingo de Los Colorados (23 de las 35 plantas identificadas) (Figura 2.10). En la Tabla 2.3 se identifican los botaderos y rellenos que tienen en su cercanía (<20 km) alguna planta de extracción de aceite, las capacidades de procesamiento de dichas plantas y la generación de residuos urbanos de los Municipios.

Tabla 2.3. GADM (botaderos y rellenos sanitarios) cercanos a plantas extractoras de aceite de palma de Ecuador – Año 2012

REGIÓN	PROVINCIA	GADM	HABITANTES (hab) año 2016	PPC (kg/hab.día)	GENERACIÓN (ton/año)	Generación dispuesta en forma inadecuada	Capacidad de procesamiento cercana (t fruto y/o palmiste por hora)	Producción de residuos agroindustriales de palma (ton/año)
COSTA	ESMERALDAS (Norte)	SAN LORENZO	54,584	0.82	16,341	100%	68	260,489
COSTA	ESMERALDAS (Sur)	QUININDÉ	138,826	0.85	42,940	100%	152	
COSTA	SANTO DOMINGO (Centro)	SANTO DOMINGO DE LOS TSACHILAS	426,910	0.90	140,915	0%	82	148,816
COSTA	SANTO DOMINGO (Norte)	LA CONCORDIA	49,435	0.63	11,384	0%	164	
COSTA	LOS RÍOS (Norte)	QUEVEDO	200,217	1.04	76,078	100%	55	80,429
COSTA	LOS RÍOS (Norte)	BUENA FE	75,988	0.72	19,832	100%		
COSTA	LOS RÍOS (Norte)	VALENCIA	50,283	0.70	12,931	100%		
COSTA	LOS RÍOS (Centro)	MOCACHE	42,072	0.72	10,981	100%		
COSTA	LOS RÍOS (Centro)	QUINSALOMA	19,076	0.61	4,247	100%	30	
SIERRA	BOLÍVAR (Norte)	LAS NAVES	7,008	0.46	1,184	100%	25	
COSTA	GUAYAS (Norte)	EL EMPALME	82,787	0.61	18,506	100%		
AMAZÓNICA	ORELLANA (Oeste)	FRANCISCO DE ORELLANA	86,117	0.82	25,781	100%	51	42,346
AMAZÓNICA	ORELLANA (Oeste)	LA JOYA DE LOS SACHAS	39,405	0.53	7,623	0%		
AMAZÓNICA	SUCUMBIOS (Centro)	SHUSHUFINDI	52,951	0.65	12,601	100%	52	
Total			1,325,659	305.33	404,757	60%		565,564

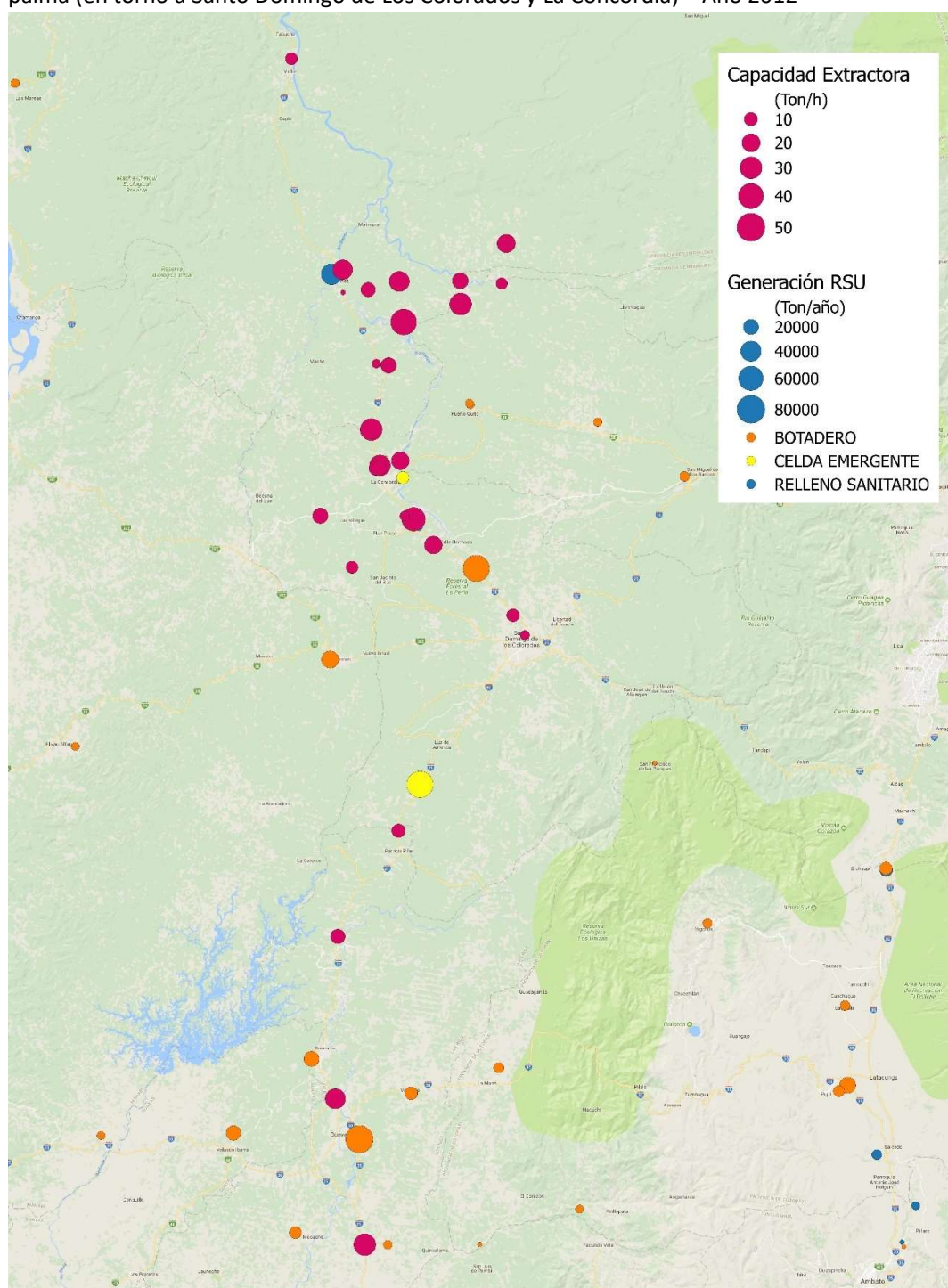
Fuente: elaboración propia en base a (PNGIDS, 2017) (MAG, 2017) y (MAE, 2017)

Figura 2.9. Ubicación de las plantas extractoras de aceite, las piladoras de arroz y los centros de disposición final de RSU de Ecuador – Año 2012



Fuente: elaboración propia en base a (MAG, 2017) y (MAE, 2017)

Figura 2.10. Detalle de la región con mayor concentración de plantas extractoras de aceite de palma (en torno a Santo Domingo de Los Colorados y La Concordia) – Año 2012



Fuente: elaboración propia en base a (MAG, 2017), (MAE, 2017) y (PNGIDS, 2017)

En base a los datos de la Tabla 2.3 y la Figura 2.9 se puede concluir a grandes rasgos que desde el punto de vista de la disponibilidad potencial de un residuo para co-gasificar, los GADM que estarían en mejores condiciones de llevar adelante una iniciativa de este tipo serían San Lorenzo, Quinindé, La Concordia, Shushufindi, Mocache, Quinsaloma, Las Naves. La posibilidad de efectivizar este potencial en estos y otros GADS dependerá de factores técnicos, logísticos y de costos, entre otros. Estos factores deben ser analizados en una escala espacial más detallada. La necesidad de aprovechar localmente los residuos generados pone una cota máxima a la capacidad de procesamiento del gasificador, lo que puede tener implicancias sobre la eficiencia del proceso de conversión y los costos, entre otros aspectos. La capacidad de procesamiento de residuos por parte de un gasificador para cada uno de los GADM listados en la Tabla 2.3 se estima groseramente entre 2,500 (Las Naves) y 100,000 t/año (Santo Domingo) (asumiendo una materia prima compuesta por 50% RSU y 50% cuesco de palma).

Entre los inconvenientes de la cascarilla de arroz y del cuesco de palma para usos térmicos se puede mencionar el elevado contenido de cenizas, la cual puede obstruir tuberías. El cuesco de palma se ha utilizado en calderas (Ramos, 2016).

3. Evaluación y caracterización de la tecnología de gasificación

3.1 La tecnología de gasificación y su contexto

La gasificación involucra un conjunto de reacciones que conducen a la oxidación parcial de un material o mezcla de materiales (e.g. residuo sólido urbano) mediante la presencia de oxígeno a través de un agente gasificador (aire, O₂, H₂O) en una relación inferior a la estequiométrica requerida para una combustión completa. Como resultado del proceso de gasificación se genera un combustible gaseoso denominado gas pobre o gas de síntesis (una mezcla variable de CO, H₂, CH₄ y otros gases), el cual puede ser utilizado para producir electricidad, calor o combustibles líquidos, entre otros productos. El agente gasificador afecta el poder calorífico del gas de síntesis, siendo habitualmente de entre 1,000 y 1,400 kcal/m³ cuando se emplea aire (el 60% es nitrógeno) y de entre 2,900 y 4,300 kcal/m³ al usar O₂. (Burgos, 2015) (En comparación, el gas natural tiene un poder calorífico inferior cercano a 8,300 kcal/m³).

Existe un espectro de tecnologías dentro de lo que habitualmente se denomina gasificación. Para el presente análisis se considerará solamente la gasificación convencional, no la gasificación por arco de plasma. La temperatura de operación para la gasificación convencional se sitúa habitualmente en el rango de 600 C-1600 C.

La gasificación forma parte de un conjunto de procesos termoquímicos entre los cuales están también la pirólisis y la incineración. Estos procesos difieren básicamente en el grado de oxidación del residuo durante la reacción. La incineración logra una oxidación total, la gasificación una oxidación parcial, mientras que la pirólisis se lleva adelante calentando el residuo en ausencia de oxígeno. En cada caso varía el aporte de energía externa, modificando la eficiencia del proceso. Cabe aclarar que en diferentes zonas del gasificador se producen reacciones tanto de combustión como de pirólisis y de gasificación.

El tipo de reacciones involucradas hacen que la gasificación sea un proceso más complejo que la incineración. Parte de la complejidad en el control del proceso de gasificación de RSU está asociada a las variaciones en las propiedades de la materia prima y se refleja en el hecho de que resulta difícil predecir la composición del gas de síntesis, la cual depende de diversos parámetros tales como el tipo de materiales presentes en la materia prima, su poder calorífico y su contenido de humedad, el agente gasificador utilizado y la temperatura y presión de operación, entre otros. Por otra parte, la producción de gas de síntesis otorga mayor flexibilidad que la incineración por la posibilidad de almacenamiento y transporte de los combustibles secundarios producidos, los cuales pueden ser gases y eventualmente combustibles líquidos de síntesis producidos en base a catalizadores (e.g. proceso Fischer–Tropsch). A su vez, el gas de síntesis puede ser utilizado para generar calor y electricidad mediante un motor de combustión, una turbina o eventualmente una celda de combustible, siendo la primera de estas opciones la más habitual a baja escala. Dado el bajo poder calorífico del gas de síntesis, la generación de electricidad en base al mismo puede requerir un co-combustible como el diesel oil o el gas natural. La eficiencia eléctrica del proceso de gasificación suele ser mayor que la correspondiente a la incineración.

Se puede considerar que la gasificación de residuos sólidos urbanos es una tecnología en etapa de despliegue y de desarrollo relativamente reciente, con limitada experiencia y disponibilidad a nivel comercial y en mucha menor escala que la incineración. Como contraste, la gasificación de biomasa y de combustibles fósiles es una tecnología madura y es utilizada desde hace décadas. Si bien existen plantas de escala tan baja como 3 ton/día, el rango típico de plantas en operación es de 30-250 miles de toneladas por año. Estas plantas generan electricidad con una eficiencia eléctrica promedio cercana al 20%, usualmente mediante un ciclo de vapor similar al utilizado en plantas de incineración. Las tecnologías de gasificación más avanzadas alcanzan eficiencias de conversión a electricidad cercanas al 40%. No se pudieron encontrar ejemplos de plantas comerciales de tratamiento de RSU dedicadas a la producción de hidrocarburos líquidos, existiendo plantas piloto y de demostración. La gasificación de RSU es una tecnología mucho menos utilizada que la incineración, debido en parte a su mayor complejidad, necesaria para mantener parámetros de operación estables ante una materia prima que puede ser altamente heterogénea. En algunos casos los costos pueden resultar inciertos y generalmente mayores a los correspondientes a un relleno sanitario. Existen aplicaciones de gasificación en baja potencia (rango de kW) para gasificación de biomasa y residuos agroindustriales (cascarilla y paja de arroz, cáscara de coco, biomasa leñosa, etc.). Existe poca experiencia con esta tecnología en América Latina. La mayor parte de las instalaciones se encuentran en Europa y Asia.

Habitualmente la gasificación requiere el pretratamiento de los residuos, incluyendo la separación de materiales inertes (e.g. vidrio y metales), el secado y la homogeneización de tamaño. El secado puede utilizar parte del gas de síntesis y del calor generado por el proceso, reduciendo la eficiencia del mismo. La performance técnica y ambiental de esta tecnología y su ecuación económica mejoran al procesar un residuo con mayor poder calorífico. Para lograrlo, las plantas de gasificación comerciales para el tratamiento de RSU habitualmente procesan un residuo con elevado contenido de plásticos y otros elementos combustibles y con baja proporción de inertes, para lo cual puede realizarse una separación del RSU que conduce a lo que habitualmente se denomina Refuse Derived Fuel (RDF). Los RSU de Ecuador presentan dos particularidades que los diferencian de los residuos habitualmente gasificados por plantas comerciales de tratamiento de residuos, el bajo contenido de plásticos y el elevado contenido de materia orgánica y por ende de humedad. Por otra parte, un mayor contenido de humedad en la materia prima puede ser favorable para la producción de hidrógeno y por ende para la síntesis de combustibles líquidos en base al proceso Fischer-Tropsch.

La reducción de volumen durante el proceso de gasificación es considerable, siendo una de las principales ventajas buscada por países con poca disponibilidad de terrenos adecuados para realizar un relleno sanitario. La generación de residuos sólidos (e.g. cenizas) es típicamente de 15%-20% en peso de la materia que ingresa al gasificador. Como consecuencia, la ocupación de terreno es considerablemente inferior a la de un relleno sanitario⁴, estando en el rango 0.20-0.55 m²/toneladas por año de capacidad de procesamiento.

El costo de inversión en un gasificador en Estados Unidos está en el rango 7500-10000 USD/kW (15 MW output). Una planta con capacidad de 750 t/año (2-4 t/día) tiene un costo de inversión de USD413,000 (WEC, 2016).

⁴ El relleno sanitario de Cuenca ocupa cerca de 9.3 m² por tonelada anual de procesamiento

Dentro de la gasificación convencional se prestará especial atención a la gasificación de corriente ascendente o updraft ya que es la tecnología seleccionada por el INER para el desarrollo de su piloto. En este tipo de gasificador el combustible ingresa por la parte superior del gasificador y desciende hacia la parte inferior, mientras que el gas de síntesis fluye en sentido contrario. Esta característica vuelve a los gasificadores de tipo updraft particularmente aptos para gasificar materiales con elevado contenido de humedad ya que parte del calor del gas generado seca la materia prima que ingresa al reactor. Esta particularidad conduce a su vez a la producción de grandes cantidades de alquitrán junto con el gas de síntesis, el cual debe ser manejado adecuadamente para evitar obstruir filtros y conductos. Ello puede redundar negativamente sobre la ecuación financiera y la eficiencia del proceso. El elevado contenido de alquitrán puede incluso conducir a que no sea recomendable utilizar el gas de síntesis producido en motores de combustión interna (Asadullah, 2014). Otra característica de este tipo de gasificador es la baja temperatura del gas de salida, lo cual mejora la eficiencia del proceso. Este tipo de gasificador se puede escalar a tamaños muy grandes.

Tabla 3.1. Ventajas y desventajas de la gasificación de RSU con bajo PCI respecto de la incineración y el relleno sanitario

Ventajas	Desventajas
Posibilidad de recuperar y almacenar energía (gases, combustibles líquidos)	Proceso cuya operación es compleja y sensible, particularmente a las características del residuo. El proceso debe ser adaptado a cada residuo para reducir las variaciones en la composición del gas de síntesis
Potencial para obtener factores de emisión más bajos (incluyendo GEI, dioxinas y furanos)	El residuo sólido urbano es heterogéneo, con bajo PCI y elevado contenido de humedad. Ello puede afectar negativamente la performance energética y financiera del proyecto. El contenido de cenizas del residuo es variable y afecta el proceso.
Potencial de mayor eficiencia eléctrica que el ciclo convencional en base a vapor. Parte de la generación es renovable.	Requerimiento estricto de pretratamiento del residuo (separación, acondicionamiento de tamaño y eventualmente secado)
Reducción de volumen muy significativa (vs relleno)	Costoso sistema de control de emisiones y limpieza de gases
Mayor recuperación de energía (vs relleno)	Baja eficiencia a pequeña escala
Reducción de foco de reproducción de vectores infecciosos (vs relleno)	Menor experiencia comercial a nivel internacional y de aplicación en América Latina. Pocos datos cuantitativos disponibles de instalaciones comerciales. En etapa de despliegue comercial
Potencialmente viable y eficiente a escala más reducida que las plantas de incineración, las cuales no suelen ser viables por debajo de las 50,000 t por año de capacidad de procesamiento.	Extenso tiempo de arranque y parada
Bajo perfil edilicio, sin necesidad de una chimenea alta.	Elevada producción de alquitrán que puede ocasionar bloqueos, particularmente en generación eléctrica
No posee la imagen negativa y oposición que puede despertar la incineración en algunas personas	Requerimiento de material para cogasificar para aumentar el rendimiento (materia prima con bajo PCI)
	La mayor parte de las plantas comerciales de gasificación usa un ciclo de vapor para generar

	electricidad, estando sujetas a las mismas limitaciones de escala y performance que las plantas de incineración.
	Elevada inversión. Puede requerir incentivos para ser competitiva con relleno sanitario
	Las plantas comerciales aún no han demostrado ventajas significativas sobre la incineración en términos de emisiones, eficiencia y residuos.

Fuente: elaboración propia en base a (WEC, 2016) (Soni, 2016)

Como antecedente de gasificación en Ecuador se pueden citar varios proyectos, entre los cuales vale la pena destacar el proyecto de generación de energía en base a cuesco de palma africana de EnerPro Cía. Ltda en la localidad de La Concordia (unos 50,000 habitantes que generan cerca de 30 ton de RSU por día). Dicho gasificador tiene una potencia de diseño de 240 kWe (400kg/h, 9t/día) y una generación estimada de 1,821 MWh/año (factor de capacidad 86%). La eficiencia eléctrica de la central es de 12.5% y la eficiencia del gasificador del 68.8%. El combustible de alimentación debe tener un tamaño menor a 3 mm y un contenido de humedad de 12% o menor. El costo de inversión estimado es de 627,000 USD (2,600 USD/kWe). A pesar de que el proyecto no fue implementado por no cerrar su ecuación financiera debido a un cambio en la tarifa regulada (Miño, 2016) es interesante tomar nota de los rendimientos y rescatar que la gasificación del cuesco de palma resultaba viable desde el punto de vista técnico. Una de las principales motivaciones para el desarrollo del proyecto era el problema asociado a la disposición inadecuada del residuo agroindustrial.

Otros antecedentes en el tema de gasificación en Ecuador incluyen diversas tesis de ingeniería y un proyecto de la Corporación para la Investigación Energética (CIE, 2010) para el desarrollo de la gasificación por arco de plasma.

3.2 Gasificador desarrollado por el INER

El gasificador desarrollado por el INER es de tipo de corriente ascendente y tiene capacidad para gasificar residuos a una tasa de 50 kg/h (escala piloto). Está instalado en La Concordia y fue adaptado a partir de un gasificador que fue diseñado para procesar los residuos sólidos urbanos generados en países más desarrollados y que no podría funcionar con el RSU de Ecuador (alto contenido de materia orgánica). De hecho, la elección de este tipo específico de gasificador probablemente obedece, en parte, a la capacidad para procesar materiales con mayor contenido de humedad que otros tipos de gasificador.

La necesidad de incrementar la eficiencia del proceso de gasificación ha conducido al INER a realizar pruebas cogasificando el RSU con carbón vegetal de cuesco de palma como forma de resolver el problema planteado por el bajo PCI del RSU y su elevado contenido de humedad⁵.

Los desarrolladores del gasificador del INER reconocen la dificultad de control de la operación cuando las propiedades de la materia prima varían a lo largo del proceso, como es el caso al gasificar RSU. Para mitigar este problema se han realizado avances en la modelación del proceso

⁵ Comunicación personal (Narváez, 2017)

de gasificación mediante el desarrollo de algoritmos de control. Sin embargo, sigue habiendo una brecha hasta alcanzar un desarrollo comercial que debe ser salvada mediante una etapa extensiva de pruebas de operación sobre el gasificador piloto. (Narváez, 2017)

El INER ha elaborado un informe (INER, 2015) donde se presenta un estudio de factibilidad técnica financiera y económica para la implementación de una planta de co-gasificación de RSU. Dicho informe presenta algunos datos cuantitativos del gasificador que ha sido desarrollado y que analizan brevemente a continuación.

Según dicho informe se plantea escalar el piloto a 500 kg/hora de capacidad máxima de tratamiento para tratar los residuos orgánicos de una población de 10,000 habitantes en zona rural, con una generación estimada de 0.74 kg/habitante. No se posee una caracterización detallada de los residuos que serían tratados en el gasificador, aunque puede asumirse que presentan las características generales descritas en la sección 2.1 para el promedio país o incluso mayor contenido de material orgánico (hasta un 80% en peso). Adicionalmente, no se indica cómo se realizaría la separación de materiales inertes y peligrosos, si los hubiera. El pretratamiento de la materia prima consistirá en una etapa de trituración y una etapa de secado dentro del mismo gasificador. Se plantea utilizar el gasificador para la producción de metanol y gasolina blanca utilizando como agente oxidante O₂ en lugar de aire. Sin embargo, no se puede descartar que el mismo gasificador pueda ser utilizado para generación eléctrica utilizando aire como agente gasificador. Se desconoce la composición del gas de síntesis producido en función de diversas materias primas y parámetros de operación.

Con relación a la eficiencia, se cita un rendimiento de 9.8 litros de metanol por tonelada de RSU en base a la utilización de O₂ como agente gasificador. No se conocen los detalles de este ensayo/cálculo (e.g. contenido de humedad, PCI y proporción de RSU y carbón vegetal). Se desconoce el rendimiento para la producción de otros productos como ser gas de síntesis, gasolina blanca, otros hidrocarburos líquidos o electricidad en función de diversas proporciones y tipos de RSU y carbón vegetal, parámetros de operación y agente gasificador.

Se desconoce el origen y costo del O₂, estimándose que se produciría in situ mediante electrólisis, con el consiguiente consumo de electricidad. No está claro si dicho consumo ha sido considerado en la ecuación financiera del proyecto.

Se asume que los ensayos de cogasificación se realizaron con carbón vegetal por disponerse de este energético en forma local y por su elevado PCI. Sin embargo, la producción de carbón vegetal tiene un costo y el producto tiene un precio de mercado, los cuales no se ven reflejados claramente en el análisis financiero (INER, 2015). Si la planta de gasificación incluyese una etapa de carbonización del cuesco de palma, se debería incluir su efecto sobre la eficiencia, aspectos ambientales y costo del proceso.

Se desconoce si se han realizado pruebas del piloto con otro tipo de residuos sólidos urbanos que posean un mayor contenido de plásticos y de otros elementos de elevado PCI (similar al disponible en grandes ciudades), y en caso afirmativo cuál ha sido el resultado.

Se desconoce si el análisis financiero contempla la infraestructura necesaria para un adecuado almacenamiento y transporte de los productos generados (e.g. metanol y gasolina blanca). Se desconoce si el análisis financiero contempla la infraestructura necesaria para el control de emisiones y el tratamiento y disposición de efluentes y residuos sólidos.

Se desconocen otras cifras cuantitativas ambientales del proceso como ser los factores de emisión, la demanda de agua y su costo, la producción neta de efluentes por tonelada de residuo procesado, la producción de alquitrán, cenizas y otros residuos por tonelada de residuo procesado. Se desconocen las características fisicoquímicas, el tratamiento y destino propuesto para los efluentes y residuos sólidos.

La mayor parte de las componentes del gasificador estaría disponible localmente, con excepción de componentes para el reactor Fischer Tropsch y el compresor (para la producción de combustibles líquidos).

4. Evaluación de aspectos económicos y financieros

Se presenta aquí un análisis de alcance parcial respecto a la Evaluación Económica básica de la tecnología de gasificación adaptada a condiciones locales propuesta por el INER, sustentada en datos de su aplicación piloto.

Como ya se ha comentado, la propuesta implica implementar una tecnología aún en desarrollo. De allí que se cuente con pocos datos económicos para plantas de gasificación de gran escala. (Gershman, 2013) indica que si bien a lo largo de la década pasada ha surgido un número significativo de casos a escala piloto y demostrativa, la tecnología de la gasificación de RSU no se ha aplicado aún a escala comercial en Estados Unidos.

A partir de estimaciones publicadas referidas a cuatro plantas en desarrollo o plantas que procesan insumos distintos a RSU se tiene un rango de costos operativos de 42 a 63 dólares por tonelada, pero los cuatro casos indicados poseen una capacidad de diseño para procesar entre 300 y 750 tn de RSU diarias, muy lejos de las 9-12 tn/día a las que se desea escalar el piloto del INER.

El cuadro siguiente permite hacerse una idea comparativa de costos de inversión para distintas opciones de gasificación.

Tabla 4.1. Costo de Capital para casos seleccionados de Gasificación

ejemplo/tecnología	[1]	[2]	[1]/ [2]
	Costo de Capital	capacidad de diseño	miles US\$/tn día de capacidad
	miles US\$	tn /día	
Piloto a Escalar INER	792	3.0	264
Proyecto Gasificación de Cuesco Palma en Sto. Domingo	627	4.5	139
Gasificador pequeño USA 2015	413	2.2	192
Enerkem	80,000	300	267
AlterNRG	156,000	750	208
Plasco	150,000	390	385
Europlasma	113,000	400	283

Fuente: elaboración propia en base a (WEC, 2016), (INER, 2015), (Miño, 2016), (Gershman, 2013).

Respecto al Proyecto de gasificación en Santo Domingo – si bien en el material bibliográfico consultado se indica un empleo de combustible (cuesco de palma) de 9 tn/día funcionando durante 354 días, para la comparación se han disminuido las horas de funcionamiento diario a la mitad. En el contexto de esta evaluación corresponde indicar que ese proyecto estaba destinado a la generación de Energía Eléctrica – no a la obtención de combustibles líquidos – y que enfrentó dificultades en su viabilidad debido a un cambio en la tarifa existente durante su planificación. La resolución CONELEC N°1/2013 fijaba precios preferenciales para energía eléctrica a partir de energías renovables no convencionales con biomasa.

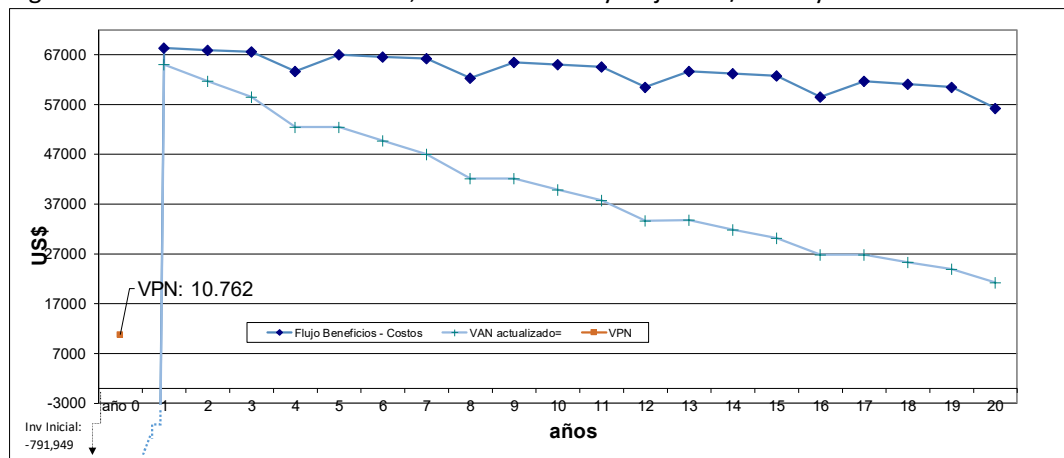
De modo similar para comparar el proyecto de escalamiento del INER, bajo evaluación, en base al valor máximo de 500kg/hora de flujo máximo de alimentación (considerando una mezcla de RSU y cuesco de palma) se determinó una capacidad de procesamiento 3 tn de RSU/día.

Sin embargo, la bibliografía consultada enfatiza la importancia sustantiva – además de la tecnología de gasificación - de los elementos específicos ya indicados, para la viabilidad de las posibles opciones:

- insumo empleado para gasificar, necesidades de transportarlo y acondicionarlo;
- subproductos obtenidos, precios, logística, disponibilidad y grado de desarrollo de los respectivos mercados,
- localización de la planta, tarifas para gestionar el RSU,
- costos de asentamiento y de los permisos de construcción, funcionamiento de la planta, disponibilidad y distribución de la infraestructura necesaria.

Para realizar la evaluación financiera básica, resumida en la Figura 4.1 y Tabla 4.1 se han empleado los costos e ingresos estimados en INER (marzo de 2015). Si bien no ha sido posible actualizar los cálculos desarrollados a partir de nueva información, como por ejemplo precios de mercado de la gasolina blanca y el metanol, u otros datos actualizados, se considera que los mismos son coherentes y pertinentes.

Figura 4.1. Valor Actual Neto Parcial, Inversión Inicial y Flujo de C/Be Proyecto Gasificación INER



Fuente: (INER, 2015)

Tabla 4.1. Valor Actual Neto Parcial, Inversión Inicial y flujos de C/B Proyecto Gasificación INER

	año 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Inversión Inicial (planta 60m2)	-791.949																				
COSTOS DE O&M																					
Servicios básicos(luz)		-395	-395	-395	-395	-395	-409	-409	-409	-409	-424	-424	-424	-424	-424	-440	-440	-440	-440	-440	
Personal		-8.496	-8.808	-9.131	-9.466	-9.814	-10.174	-10.547	-10.934	-11.335	-11.751	-12.183	-12.630	-13.093	-13.574	-14.072	-14.589	-15.124	-15.679	-16.254	-16.851
Repuestos y mantenimiento		-2.328	-2.328	-2.328	-5.928	-2.328	-2.328	-2.328	-5.928	-2.328	-2.328	-2.328	-5.928	-2.328	-2.328	-2.328	-5.928	-2.328	-2.328	-2.328	-5.928
Costos Totales	-791.949	-11.219	-11.531	-11.854	-15.789	-12.536	-12.911	-13.284	-17.272	-14.073	-14.489	-14.935	-18.982	-15.846	-16.326	-16.824	-20.957	-17.892	-18.447	-19.022	-23.219
INGRESOS																					
Venta de Metanol		22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093	22.093
Venta de Gasolina Blanca		42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479	42.479
Gas de síntesis		14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950	14.950
Ingresos Totales	0	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523	79.523
Flujo Beneficios - Costos	-791.949	68.304	67.992	67.669	63.734	66.987	66.612	66.239	62.252	65.450	65.034	64.588	60.541	63.677	63.197	62.699	58.567	61.631	61.076	60.501	56.304
Flujo Beneficios - Costos actualizados	-791.949	65.052	61.671	58.455	52.434	52.486	49.707	47.075	42.134	42.190	39.925	37.763	33.711	33.769	31.919	30.159	26.830	26.889	25.378	23.942	21.220
VPN:	10.762																				

Fuente: (INER, 2015)

Notas: se considera una vida útil o período de 20 años, una tasa de descuento del 5%. Se toma la valorización de productos vendidos original, al igual que los costos parciales incluidos. La tasa interna de retorno resulta ligeramente superior a la de descuento: 5,164

La principal observación es que en (INER, 2015) no se habría contemplado la totalidad de los costos financieros involucrados. Como ya se ha indicado, faltarían elementos que conforman el costo total:

- Costo de separación de materiales inertes y peligrosos (e.g. vidrio y metales)
- Costo de producción de carbón vegetal a partir del cuesco de palma y de transporte del cuesco
- Costo del agente oxidante O2 (se produciría in situ mediante electrólisis)
- Costo de la infraestructura necesaria para un adecuado almacenamiento y transporte de los productos generados (e.g. metanol y gasolina blanca).
- Costo de la infraestructura necesaria para el control de emisiones y el tratamiento y disposición de efluentes y residuos sólidos (alquitrán, cenizas y otros residuos).
- Costo del abastecimiento de agua

Todos estos valores deben integrarse al costo financiero calculado para permitir la evaluación completa.

Respecto a los costos evitados y beneficios adicionales, el informe de referencia (INER, 2015) contiene un buen ejercicio destinado a completar una evaluación financiera básica con elementos de evaluación económica. Sin embargo, el alcance del presente reporte abarca sólo la viabilidad financiera, sin elaborar los beneficios adicionales (para toda la sociedad, por ejemplo, por contaminación evitada y globales, por ejemplo, en términos de emisiones evitadas) que integran el análisis económico.

5. Evaluación de aspectos técnicos

La experiencia internacional así como la búsqueda por parte del INER de una materia prima de alto poder calorífico inferior para co-gasificar los residuos sólidos urbanos con alto contenido de materia orgánica indican la baja viabilidad técnica de gasificar los residuos de zonas rurales y pequeñas ciudades de Ecuador. En estas zonas podría resultar viable técnicamente la co-gasificación de parte de los residuos sólidos urbanos con algún residuo agroindustrial o foresto-industrial de adecuadas características: elevada disponibilidad a bajo costo, cercanía a la zona de concentración de residuos sólidos urbanos, elevado PCI y baja humedad. Estas condiciones reducen la aplicación de la cogasificación de RSU a nichos específicos, por ejemplo, en la zona de La Concordia, donde existe una elevada producción de residuos agroindustriales de palma africana (cuesco y fibra), los cuales en algunos casos representan un problema ambiental. En este caso la gasificación tendría como productos la generación de electricidad y calor a ser utilizados localmente. Sin embargo, para analizar la viabilidad técnica de esta propuesta es necesario realizar pruebas específicas de co-gasificación con estos residuos y evaluar todos los parámetros ambientales y de rendimiento. Adicionalmente, el cantón donde se instale un gasificador para el procesamiento de residuos sólidos urbanos deberá cumplir con ciertos requisitos indispensables que hacen al pretratamiento de los residuos. Estas condiciones involucran contar con la capacidad e instalaciones adecuadas para separar materiales inertes y peligrosos (e.g. vidrio y metales) y acondicionar el tamaño y proporción de las diferentes materias primas que ingresan al gasificador.

En algunas de las grandes ciudades de Ecuador (e.g. Quito), la mayor proporción de plásticos y otros elementos de medio y elevado PCI presente en los residuos sólidos urbanos podría ameritar el estudio de la viabilidad de implementar la gasificación de una fracción seleccionada de los residuos, ya sea en base a un origen diferenciado o en base a los materiales no aprovechados de alguna de las plantas de separación existentes o planificadas. Esto reduce las posibilidades de tratamiento de los residuos a una fracción del residuo generado en las grandes ciudades. En estos casos es necesario realizar pruebas piloto con estos materiales y analizar la performance ambiental y operativa para la producción de electricidad y combustibles líquidos. Al igual que en el caso de co-gasificación, resulta indispensable contar con la capacidad de gestión e infraestructura necesarias para seleccionar adecuadamente la materia prima a gasificar y realizar el pretratamiento de ésta.

Por lo indicado anteriormente se deduce que la aplicación de la tecnología de gasificación no representaría una solución general al tratamiento de los RSU en Ecuador y se restringiría a los nichos arriba descritos, cuya factibilidad técnica es necesario analizar en base a experiencias piloto.

Con relación a los conocimientos y capacidades locales para el desarrollo y construcción del gasificador de tipo updraft, los mismos parecen ser adecuados a escala piloto y también para desarrollar una eventual planta a escala de demostración. Adicionalmente, según informa el INER, la mayor parte de las componentes para la fabricación del gasificador de tipo up-draft estarían disponibles localmente. Cabe aclarar que en base a la información provista no se ha

podido evaluar fehacientemente la performance ambiental y el rendimiento operativo del gasificador propuesto para la materia prima y agente gasificador utilizado en las pruebas realizadas.

El desarrollo de adecuada capacidad de operación y mantenimiento puede representar una barrera significativa a la implementación de la tecnología de gasificación, particularmente en zonas rurales y pequeños GADM, ya que el mantenimiento de los parámetros de operación del gasificador para RSU dentro de un rango adecuado es una tarea compleja. Es probable que el desarrollador del gasificador deba asistir durante un periodo prolongado al operador para evitar una baja performance técnica y problemas desde el punto de vista ambiental. El monitoreo del cumplimiento de los estándares técnicos, ambientales y de seguridad también representará un desafío.

6. Análisis del marco institucional y legal

El manejo y medidas de acción respecto a los RSU, depende de la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS), que está bajo la órbita de las autoridades locales. Involucra procesos complejos, requiere especialización y conocimiento específico abarcando las dimensiones socio-económica, técnica y político- gubernamental (Ministerio del Ambiente- PNGIDS, 2015).

Desde una perspectiva histórica, puede tomarse como punto de partida el "Análisis Sectorial de Residuos Sólidos del Ecuador" del año 2002, Organización Panamericana de la Salud (OPS) Organización Mundial de la Salud (OMS) que adopta un enfoque sistémico, multidisciplinario e intersectorial para el desarrollo de la gestión de RSU. Este análisis careció de una línea base con indicadores de eficiencia para evaluar en profundidad tanto al propio estudio, como otras posibles estrategias.⁶ Desde el año 2002 hasta el 2010 de un total de 221 municipios, 160 disponían sus desechos en botaderos a cielo abierto (PNGIDS, <http://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>).

En 2010, se crea el Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (MAEPNGIDS), con el objetivo de impulsar la gestión de los residuos sólidos bajo criterios integrales y sostenibles.

El programa se encuentra ahora en una “nueva etapa” habiéndose ampliado el plazo de ejecución hasta el 2017, año en el que se pretendía llegar a la erradicación de los botaderos a cielo abierto de todos los municipios del país.

El MAEPNGIDS hace mención explícita de elementos que se destacan en la actual propuesta de Escalamiento y aplicación de tecnología, entre ellos:

- El impulso a la agregación de valor en base tanto a Waste to Energy, cómo al reciclaje

⁶ El COOTAD [Código Orgánico de Descentralización Autonomía y Descentralización] artículo 55 establece que los Gobiernos Autónomos Descentralizados municipales son los responsables directos del manejo de sus desechos sólidos – pero: poseen baja capacidad de gestión, muchos instauraron unidades para la provisión del servicio, dependientes de direcciones de higiene o comisarías municipales.

- Explicitación de la necesidad de reestructurar el modelo tarifario de los servicios dados por los GADs, en cuanto a gestión de RSU y residuos sólidos especiales. la inversión actual de los GADs en tales servicios no es recuperada con el tiempo, no siendo claro bajo qué tarifa (monto o medio de cobro) se recuperará la inversión.
- Creación de mancomunidades: por razones similares, para los GADs más pequeños supone inversiones que no se recuperan con el tiempo, se propone agruparlos.

Adicionalmente se identifican vínculos con el marco político Nacional global, existiendo alineación con los objetivos ministeriales del Consejo Sectorial y del Plan del Buen Vivir. Siendo tal vez necesario reforzar las acciones de monitoreo que verifiquen un cumplimiento efectivo según lo planeado.

En cuanto a la regulación de sustento, se destacan⁷:

- La Constitución de la República del Ecuador - Art. 14: reconoce el derecho a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir. Se declara de interés público la preservación del ambiente, conservación de ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados. Art. 15: el Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto.
- Plan Nacional del Buen Vivir 2009 – 2013 - objetivo 4: “Garantizar los derechos de la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable”; Objetivo 7 “Garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global”
El Plan garantiza los derechos de la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable, considerando 15 metas, de las cuales 5 le competen al Ministerio del Ambiente.
- El Estatuto Orgánico de Gestión Organizacional por Procesos del MINISTERIO DEL AMBIENTE que define los productos y servicios de cada unidad administrativa.
- Ley de Gestión Ambiental - Registro Oficial Suplemento 418/ 2004, Art 2: establece los principios y directrices de política ambiental; determina las obligaciones, responsabilidades, niveles de participación de los sectores público y privado en la gestión ambiental y señala los límites permisibles, controles y sanciones en esta materia. Se sujeta a los principios de solidaridad, corresponsabilidad, cooperación, coordinación, reciclaje y reutilización de desechos, utilización de tecnologías alternativas ambientalmente sustentables y respecto a las culturas y prácticas tradicionales.
- Ley Orgánica de Educación Superior - Registro Oficial Nº 298 /2010, artículos 8, 9 y 13: uno de los fines de la Educación Superior es fomentar y ejecutar programas de investigación de carácter científico, tecnológico y pedagógico que coadyuven al mejoramiento y protección del ambiente y promuevan el desarrollo sustentable nacional. Es función del Sistema de Educación Superior promover el respeto de los derechos de la naturaleza, la preservación de un ambiente sano y una educación y cultura ecológica.
- Política Ambiental Nacional (PAN) 2009 - objetivo general “encontrar el balance entre producción, ambiente y el ciudadano; fundamentados en políticas que mejoren la calidad ambiental, que conserven el patrimonio natural y fortalezcan la institucionalidad”.

⁷ A partir de <http://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/> y Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013.

Este último instrumento en particular explicita un camino ineludible – y de escasa mención en la legislación de América Latina y Caribe - para hacer un manejo sustentable de los residuos: el consumo responsable y sostenible de bienes y servicios para atender las necesidades básicas y contribuir a mejorar la calidad de vida, minimizando el uso de recursos naturales, materiales tóxicos y emisiones contaminantes, evitando de este modo poner en peligro los recursos de futuras generaciones. Esto requiere desarrollar relaciones firmes entre sectores productivos, sociales y estatales, estableciendo vínculos claros entre la producción y el consumo para que el impacto ambiental sea mínimo.

Puede identificarse entonces una mención explícita a la estrategia WTE para poner en valor los RSU, que constituye el marco de la evaluación aquí desarrollada.

Según el propio Ministerio del Ambiente -PNGIDS, 2015 - la cadena de valor en la GIRS puede ser descrita a partir de dos grandes ámbitos o secciones: **la prestación del servicio básico de recolección y disposición de residuos**, y **la cadena de recuperación y el reciclaje**. La prestación del servicio básico de aseo, recolección y disposición de residuos es una competencia de los gobiernos autónomos descentralizados municipales (GADM) definida por el marco legal ecuatoriano.

La segunda sección de la cadena de valor lo constituye el sistema de recuperación, almacenamiento y aprovechamiento de los residuos. La misma no tiene un marco legal definido y se caracteriza por la informalidad y la influencia de intereses y emprendimientos comerciales, constituye un mercado asimétrico, informal, sin información disponible. Está integrada por intermediarios que articulan una amplia red de abastecedores desde recicladores a pie de vereda – a quienes pagan precios muy bajos -hasta grandes centros de acopio asociados a empresas (Ministerio del Ambiente -PNGIDS, 2015)⁸. Más recientemente actores tales como empresas industriales y comercios, entregan los residuos sólidos directamente a varios gestores ambientales, saltando el rol de los recicladores a pie de vereda.

Las industrias de reciclaje se aglomeran en Quito, Guayaquil y Cuenca, concentrando físicamente a los mercados de los residuos reciclables, y fortaleciendo el rol de los intermediarios que se erigen en el principal mercado del eslabón de la comercialización. Muchas empresas compran materiales reciclados a los intermediarios, mientras que algunas están reconociendo los precios completos, desarrollando un sistema propio de recolección de material reciclable, completando cadenas de acopio y comercialización con inclusión de los recolectores a pie de vereda. La actividad del reciclaje es capital- intensiva, pero carece de acceso a financiamiento necesario para impulsar el proceso productivo⁹.

Este contexto es interpretado como un motivador e impulsor al aprovechamiento integral de los elementos recuperables contenidos en los RSU. La capacidad para generar energía y calor a partir de una fracción de los residuos implica también obtener valor, viabilizando la gestión de

⁸ Por ejemplo, por los envases PET se paga a los recolectores a pie de vereda USD 0,15 el kilo, mientras que los intermediarios revenden hasta por USD 0,90 el kilo (Ministerio del Ambiente -PNGIDS, 2015).

⁹ Debido las distancias entre centros de acopio e industrias procesadoras, el transporte de material reciclable alcanza costos de entre USD 20 y USD 80 por tonelada, según el material transportado (Ministerio del Ambiente -PNGIDS, 2015).

las otras fracciones recuperables, de bajo valor de mercado, pero de alto valor económico al considerar la cadena completa de recuperación y reciclaje.

Un aliado que debe sumarse al desarrollo de la cadena de valor descrita es el estamento Universitario. El mismo debe desarrollar una función integral a partir de; “la articulación de acciones de educación, formación, capacitación, investigación, acción y diálogo de saberes para el Buen Vivir” (Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación, 2012, en Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013). La Universidad está relacionada con la problemática ambiental y es convocada para la búsqueda y aplicación de soluciones, construyendo así su responsabilidad con el medio natural y social, puntualmente está posicionada en un lugar apropiado para convocar a la fracción informal de la cadena de valor y fortalecerla, cambiando el tipo de vínculo que posee con los eslabones más rentables.

7. Análisis de viabilidad integrado, identificación de las principales barreras y estrategias para superarlas

La Tabla 7.1 presenta la síntesis de diversas ventajas y desventajas asociadas a la gasificación de corriente ascendente aplicada al tratamiento de los RSU de Ecuador

Tabla 7.1. Evaluación integrada

Aspecto	Ventajas	Desventajas / Desafíos	Grado de Viabilidad
1. Compatibilidad con tipología RSU Ecuador	- En principio, no se puede descartar la posibilidad de gasificar un combustible derivado de los residuos, por ejemplo, elaborado a partir de plásticos y otros materiales con elevado PCI que no puedan ser reciclados. Para evaluar esta posibilidad es necesario caracterizar en forma más detallada el residuo generado en grandes centros urbanos y la posibilidad de gasificar una fracción de los residuos proveniente de tareas de separación o de fuentes específicas. - Existen importantes volúmenes de residuos agroindustriales que tendrían potencialidad como materia prima para un gasificador.	- Alto contenido de humedad y bajo PCI en RSU de Ecuador. Variabilidad geográfica y estacional - Requerimiento de pretratamiento, con el consiguiente gasto de energía y recursos. - Se requiere cogasificar con algún residuo de alto PCI, con los problemas de la logística asociada. Algunas de las alternativas en zona rural son cuesco y fibra de palma, cáscara de coco y cascarilla de café. Algunos de estos residuos podrían generar abundante ceniza y ocasionar problemas de obstrucción. Sólo permitiría procesar una fracción de los residuos orgánicos generados. - En grandes centros urbanos la cogasificación con plásticos y otros materiales con elevado PCI sólo permitiría procesar una fracción de los residuos orgánicos generados. - Los nichos identificados no darían una respuesta generalizada a la disposición de los residuos orgánicos en Ecuador. - No se conocen ensayos del gasificador INER con plásticos y otros materiales combustibles que estarían asociados a los principales nichos identificados	Bajo (potencialmente Alto para cogasificación con residuos agroindustriales o para el aprovechamiento de residuos de fuentes seleccionadas)
2. Compatibilidad con sistema de manejo actual	- La gasificación es, en principio, compatible con los programas de separación de residuos, particularmente de vidrio y metales. - La gasificación, en caso de ser viable, conduciría a una significativa reducción de volumen del residuo procesado, contribuyendo al objetivo de eliminar los botaderos	- La experiencia en plantas de separación es aún limitada en Ecuador (e.g. Quito) - La separación de vidrio, metal y otros inertes puede plantear un desafío para municipios no muy grandes. - Las actividades de recuperación de plásticos de los RSU podrían en algunos casos reducir la viabilidad de gasificación de los RSU para recuperación de energía, dependiendo de la fracción de plásticos no reciclables generada y separada. - El desarrollo de adecuada capacidad de operación y mantenimiento puede representar una barrera significativa a la	Bajo (GADM sin separación de inertes y peligrosos).

		implementación de la tecnología de gasificación, particularmente en zonas rurales y pequeños GADM, ya que el mantenimiento de los parámetros de operación del gasificador para RSU dentro de un rango adecuado es una tarea compleja. Es probable que el desarrollador del gasificador deba asistir durante un periodo prolongado al operador para evitar una baja performance técnica y problemas desde el punto de vista ambiental. Se debe analizar la compatibilidad con los contratos realizados con empresas privadas para las operaciones de tratamiento y disposición de RSU en relleno sanitario.	
3. Aspectos tecnológicos y ambientales	- La gasificación updraft es un proceso energéticamente eficiente (baja temperatura del gas de salida). Apto para combustibles con elevada humedad (25%-50%) ya que parte del calor del reactor sirve para secar la biomasa que ingresa. Posee flexibilidad para el procesamiento de diversas biomásas. - Recuperación de energía térmica, mecánica y eléctrica - Diseño robusto y simple. - La gasificación posee menores emisiones GEI comparada con un relleno sanitario. - Reducción de otros impactos ambientales asociados a los rellenos sanitarios (e.g. vectores infecciosos, ocupación de terreno). - La gasificación tiene el potencial para destruir contaminantes orgánicos y concentrar y contener contaminantes inorgánicos. Con una operación adecuada no deberían producirse emisiones significativas de dioxinas y furanos - Posible recuperación de materiales reciclables de las cenizas y otros residuos del proceso.	- En lo que se refiere al procesamiento de RSU, se trata de una tecnología aún en etapa de despliegue comercial, con mucha menos experiencia acumulada a nivel internacional que la incineración o los rellenos sanitarios. - La gasificación produce emisiones, efluentes y residuos sólidos. Son necesarios controles ambientales para cada uno de estos flujos., los cuales tienen costos asociados. - Los gasificadores de tipo updraft producen un considerable volumen de alquitrán en el gas de síntesis, más aún cuando la materia prima posee un elevado contenido de humedad. Los equipos de limpieza del alquitrán pueden ser costosos y justificarse a partir de cierta escala. El alto contenido de alquitrán también puede producir problemas para la generación de electricidad. - La disposición adecuada de alquitranes y condensados puede representar un problema. - Potencial generación de emisiones de dioxinas y furanos (controlables pero dependientes de la modalidad de operación y la tecnología). - La producción de alcoholes y combustibles líquidos en general requiere oxígeno como agente gasificador para ser viable, lo cual incrementa los costos y plantea desafíos de seguridad y ambientales referidos al almacenamiento, manejo y transporte de los productos. - No se ha podido evaluar fehacientemente la performance ambiental y el rendimiento operativo del gasificador propuesto para la materia prima y agente gasificador utilizado en las pruebas realizadas.	Medio a Alto (requiere adecuada materia prima y control de la operación)

4. Viabilidad financiera / Económica	- Potencialmente más eficiente que la generación de electricidad en base a turbovapor. Brinda beneficios por recuperación de energía y materiales - Posee externalidades positivas de difícil cuantificación, algunas de ellas asociadas a los impactos negativos evitados de los rellenos sanitarios y otros métodos de disposición final de RSU	- Elevado costo de inversión - Para la producción de alcoholes y líquidos combustibles sería necesario considerar el costo del O₂ y la infraestructura necesaria para el almacenamiento y transporte. Estas componentes, así como las relacionadas con los controles ambientales no parecen haber sido consideradas en el análisis financiero provisto - La provisión de una materia prima adecuada para co-gasificar puede tener asociados costos significativos de adquisición y de logística (e.g. flete) - Surge una variedad de costos adicionales que requieren una estimación sitio – específica para evaluar viabilidad. Como antecedente se indica que la tarifa eléctrica ha vuelto inviable un proyecto de gasificación de cuesco de palma en La Concordia.	Incierto (se requieren más datos cuantitativos del proceso y logística). Dependencia de la tarifa eléctrica y los incentivos
5. Potencial para difusión comercial y aumento de escala	Habría un nicho para esta tecnología en aquellos municipios con disponibilidad de un residuo adecuado para co-gasificar (e.g. residuos agroindustriales con elevado PCI o plásticos no reciclables).	- El requerimiento de co-gasificación es una limitante significativa para la difusión de esta tecnología para el tratamiento de RSU. - La ampliación de escala está supeditada al acceso a un volumen adecuado de materia prima de elevado PCI - La complejidad de operación y elevado requerimiento de asistencia técnica puede acotar el potencial para difusión comercial. Se debe estudiar cuidadosamente el esquema de transferencia del conocimiento para la operación propuesto por parte del INER a una empresa o Municipio.	Medio a Bajo (debido a la disponibilidad local de residuos adecuados para cogasificar y complejidad de operación)
6. Compatibilidad con marco institucional	- Los objetivos y metas planteadas por el PNGIDS son, en principio, compatibles con el desarrollo e implementación de la tecnología de gasificación, la cual podría contribuir principalmente a los objetivos de eliminación de botaderos y al aprovechamiento energético de los residuos. - La gasificación de RSU no necesariamente es incompatible con la recuperación de materiales reciclables. Uno de los aspectos clave en este sentido es conocer el volumen de plásticos no reciclables generado en Ecuador.	Es necesario analizar la posible interacción entre los objetivos de reciclaje y la implementación de tecnologías Waste to Energy de tipo termoquímica como la gasificación, ya que algunos materiales como los plásticos podrían ser determinantes para garantizar la viabilidad de estos procesos. Para ello es necesario contar con información referida al volumen y tipo específico de materiales generados (particularmente plásticos reciclables y la fracción remanente de no reciclables) que son objetivo de un programa de reciclaje en el marco del PNGIDS.	Alto (se requieren más datos referidos a los programas de reciclado)
7. Compatibilidad con marco legal	La experiencia internacional parece indicar que esta tecnología es, en principio, compatible con el cumplimiento de estrictos estándares ambientales y con políticas de manejo sustentable de los residuos.	La compatibilidad de la tecnología específica desarrollada por el INER con el marco legal está sujeta al cumplimiento de los estándares ambientales establecidos por la regulación por parte de los procesos de recuperación de energía. En este sentido, no	Incierto - Potencialmente Alto (se requieren más datos para conocer la performance ambiental)

		se ha podido evaluar fehacientemente la performance ambiental del gasificador propuesto. El cumplimiento de estándares ambientales requiere un adecuado control del proceso y de la materia prima, lo cual puede representar un desafío para algunos GADM de Ecuador, particularmente en operaciones a baja escala y lejos de grandes centros urbanos.	
8. Conocimiento local / Capacidad de fabricación nacional	- En Ecuador existen conocimientos y capacidades locales para el desarrollo, construcción y operación del gasificador de tipo updraft a escala piloto y también para desarrollar una eventual planta a escala de demostración. Se cuenta con capacidades técnicas específicas INER, INIAP, ENERPRO, CIE, entre otros. - La mayor parte de las componentes para la fabricación del gasificador de tipo up-draft estarían disponibles localmente.	- Algunas de las componentes para la producción de combustibles líquidos son importadas: componentes para el reactor Fischer Tropsch y el compresor (para la producción de combustibles líquidos). - En el caso del gasificador desarrollado por el INER, no se posee información sobre las componentes relacionadas con el control de emisiones y efluentes.	Medio a Alto (a escala piloto)

Fuente: elaboración propia

La Tabla 7.2 presenta una síntesis de las principales barreras y estrategias para el desarrollo del gasificador de tipo up-draft en el caso de Ecuador.

Tabla 7.2. Principales barreras y estrategias para su superación

Barreras	Estrategias
Alto contenido de materia orgánica en RSU (bajo PCI) lo vuelve poco viable para gasificar	- Explorar el potencial para co-gasificar con algún residuo con alto PCI (e.g. agroindustrial o una fracción seleccionada proveniente de planta de separación de residuos o de determinados barrios o actividades). - Analizar la generación y disponibilidad de plásticos no reciclables en grandes ciudades
No resulta conveniente ni viable transportar los residuos grandes distancias para alimentar una planta WTE. Los residuos deben ser procesados localmente.	Generar la electricidad en el punto de concentración del RSU y también del residuo a co-gasificar (e.g. planta de transferencia, planta de separación o relleno sanitario. El cruce de información georreferenciada ofrece una primera aproximación al potencial práctico de implementación. Las centrales deberían tener una escala adecuada al residuo disponible en cada localización.
La utilización de carbón vegetal como materia prima para cogasificar plantea potenciales problemas de abastecimiento y costo	Explorar otros residuos con elevado PCI, que estén potencialmente disponibles en forma abundante y a bajo costo, y cuya disposición final represente un problema ambiental (e.g. agroindustriales).

Complejo control de la performance del gasificador ante variaciones en las características de la materia prima y parámetros de operación.	Probar extensivamente los métodos de control teóricos de la operación (Narváez, 2017) sobre el piloto.
La implementación de políticas de reciclado y recuperación de materiales con elevado PCI (e.g. plásticos) podría afectar la viabilidad de la tecnología de gasificación	Analizar la generación y disponibilidad de plásticos reciclables y no reciclables en grandes ciudades. Estudiar el posible impacto sobre el PCI de la mezcla de residuos remanente luego de recuperar la fracción reciclable. Evaluar la compatibilidad de la gasificación con las operaciones de las plantas de separación existentes y planificadas para Ecuador.
La operación del gasificador podría ocasionar emisiones, efluentes y residuos sólidos que deben ser controlados adecuadamente	Cuantificar el rango de emisiones, efluentes y residuos sólidos generados por el gasificador INER en función de diferentes parámetros de operación y características de las materias primas, incluyendo aquellas correspondientes a los nichos identificados. Evaluar la compatibilidad con los estándares ambientales vigentes en Ecuador para este tipo de operaciones.
La viabilidad económica puede verse comprometida por una pobre performance desde el punto de vista técnico	- Evaluar cuantitativamente los rendimientos para la producción de electricidad y/o hidrocarburos líquidos en base a un rango de materias primas, incluyendo aquellas correspondientes a los nichos identificados. - Completar la estructura de costos incurridos. Incluir costos de pretratamiento (e.g. carbonización del cuesco), costo adicional del oxígeno, costo del agua y costos asociados al control ambiental
El desarrollo de una infraestructura adecuada de seguridad y control ambiental puede tener un peso significativo en la inversión de un gasificador	Realizar una evaluación de costos que incluya el control de emisiones y efluentes, la disposición de residuos sólidos, y la implementación de medidas de seguridad, y en caso de que sea necesario una infraestructura adecuada para el almacenamiento y transporte de hidrocarburos líquidos
El valor de la tarifa eléctrica puede resultar crítico para determinar la viabilidad técnica del proyecto	- Evaluar la sensibilidad a la tarifa eléctrica y a los precios de los productos comercializables. - Evaluar la existencia de incentivos y elementos que permitan mejorar la ecuación financiera
La transferencia de la operación a un Municipio o Empresa puede resultar compleja y ocasionar problemas técnicos y ambientales	Elaborar un esquema de O&M que contemple la complejidad de estas tareas. En caso de transferirse la operación a una empresa o un Municipio, se debe asegurar una adecuada capacitación y una asistencia técnica adecuada durante un prolongado período de tiempo, particularmente en el caso de instalaciones con difícil acceso.
La gasificación de combustibles derivados del RSU requerirá tareas de separación/selección y adecuación de la composición de la materia prima. Lo cual requiere el desarrollo de una adecuada infraestructura, gestión y capacitación	Seleccionar nichos de aplicación en aquellos GADM que ya cuenten con operaciones e infraestructura de separación en marcha, particularmente de metales, vidrio y otros inertes, o que demuestren haber realizado acciones en este sentido.

Fuente: elaboración propia

8. Conclusiones y recomendaciones

Tal como lo demuestra la experiencia internacional, uno de los principales desafíos de la gasificación de RSU desde el punto de vista técnico y económico consiste en la obtención de adecuados rendimientos y parámetros de operación a partir de un material heterogéneo como son los residuos sólidos urbanos, especialmente cuando presentan un alto contenido de humedad y bajo poder calorífico neto, como sería el caso del RSU presente típicamente en Ecuador. Los gasificadores comerciales existentes para el tratamiento de RSU son complejos de operar y funcionan en base al aprovechamiento de residuos con mayor poder calorífico que el presente en Ecuador, usualmente debido a un mayor contenido de plásticos.

Los ensayos realizados por el INER de co-gasificación del RSU con otros materiales de alto poder calorífico como el carbón vegetal de cuesco de palma reflejan este problema de base, interpretándose como un intento de buscar una alternativa que mejore la eficiencia del proceso. Esta primera limitación circunscribe la potencial utilización de la tecnología propuesta a un nicho donde exista elevada disponibilidad de un material adecuado para co-gasificar junto al RSU o bien donde la tipología de materiales presentes en el RSU difiera sustancialmente de los promedios informados para Ecuador en términos de poder calorífico inferior. Este último caso podría darse al aprovechar los RSU de fuentes muy específicas con mayor contenido de plásticos (e.g. algunos sectores de las grandes ciudades, RSU de instituciones educativas o de establecimientos comerciales, plásticos no reciclables recuperados en una planta de separación de residuos), en cuyo caso la escala y la logística de recolección deben ser estudiadas en detalle para determinar la viabilidad. Estos nichos acotan significativamente la potencial aplicación de la gasificación para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos generados en Ecuador.

Como conclusión general se puede indicar que en base a la información disponible no se puede verificar la aptitud de la gasificación para procesar adecuadamente el RSU típico de Ecuador sin la utilización de co-materiales de elevado PCI disponibles abundantemente, y por ende no se puede considerar que esta tecnología pueda representar una solución general al tratamiento de los RSU en este país. Sin embargo, sí podría resultar de interés para el tratamiento de los RSU en nichos específicos como los mencionados anteriormente (e.g. cogasificación con residuos agroindustriales o gasificación de residuos de fuentes seleccionadas).

Aunque los cálculos teóricos y las simulaciones suministradas aportan datos al presente análisis, no es posible determinar la viabilidad de la tecnología basándose casi exclusivamente en los mismos. Para avanzar con una evaluación de viabilidad de los nichos identificados se recomienda la realización de pruebas concretas que permitan obtener datos cuantitativos específicos asociados a la performance medida en operación real de la gasificación y co-gasificación de un rango de materias primas representativo de los nichos en el gasificador propuesto, tanto para generación eléctrica como eventualmente para la producción de hidrocarburos líquidos.

El otro aspecto que es recomendable medir para poder realizar una evaluación de viabilidad es la performance ambiental del proceso completo en estado estacionario, arranque y parada, incluyendo el control, tratamiento y disposición de: emisiones aéreas, efluentes y residuos sólidos. También resulta necesario realizar una evaluación de riesgo de accidentes para la tecnología desarrollada.

Con relación a los productos potenciales del proceso de gasificación, se presentan básicamente dos alternativas, la cogeneración de electricidad y calor y la producción de hidrocarburos líquidos. En base a los datos existentes del gasificador desarrollado por el INER no es posible realizar una evaluación económica-financiera detallada de estas alternativas, principalmente debido a la ausencia de algunos datos cuantitativos (e.g. rendimientos medidos para generación eléctrica y producción de gasolina blanca, costos asociados a insumos como el O₂, costos asociados a los sistemas de control de emisiones, disposición de residuos y efluentes, generación eléctrica, almacenamiento y transporte de hidrocarburos). Todos los productos potenciales del proceso de gasificación poseen un mercado en Ecuador, siendo sus precios, la tarifa eléctrica e incentivos aspectos clave para determinar la viabilidad financiera. La electricidad y el calor podrían ser utilizados localmente, mientras que los hidrocarburos como la gasolina blanca y el metanol en general plantean desafíos de almacenamiento y transporte que deben ser analizados en detalle.

La co-gasificación de RSU con residuos agroindustriales merece especial atención dado su potencial para resolver dos problemas ambientales actuales de Ecuador y ofrecer una alternativa de aprovechamiento energético. Se recomienda avanzar y profundizar en esta línea de investigación, poniendo énfasis en el ensayo de la co-gasificación con residuos agroindustriales disponibles ampliamente en Ecuador y prestando especial atención a los aspectos de seguridad de operación, ambientales y logística, los cuales podrían tener una significativa influencia sobre los costos y la viabilidad de implementación. También se recomienda avanzar en la búsqueda de una solución más amplia para el tratamiento de los residuos agroindustriales, algunos de los cuales ofrecen un interesante potencial de recuperación energética por vía termoquímica (material homogéneo con bajo nivel de humedad).

Finalmente, se recomienda realizar un estudio que caracterice más detalladamente los residuos generados y recolectados en Ecuador, especialmente los materiales no recuperados provenientes de la planta de separación de Quito y de otras similares que se puedan llegar a implementar. En áreas rurales y de fincas, dado el alto contenido de materia orgánica y de humedad del RSU, se recomienda analizar las opciones de tratamiento biológicas para el RSU (digestión aeróbica y anaeróbica), tanto centralizada como descentralizada.

Referencias

- ARCONEL Estadística Annual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano - 2016, Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2017
- Asadullah Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review, M. Asadullah, Renewable and Sustainable Energy Reviews 29 (2014) 201–215
- Bocci State of art of small scale biomass gasification power systems: a review of the different typologies, E. Bocci et al., Energy Procedia 45, 2014, 247–256
- Burgos Gasificación de cuesco de palma para la obtención de gas combustible en un reactor de lecho fijo, J. Barco Burgos, Tesis, Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica Bogotá, Colombia, 2015
<http://www.bdigital.unal.edu.co/56172/7/JIMMYBARCOBURGOS.2015.pdf>
- CIE Estudio básico de la gasificación de biomasa, Noticia publicada por la Corporación para la Investigación Energética, Ecuador, 2017a
<http://energia.org.ec/cie/estudio-basico-de-la-gasificacion-de-la-biomasa/>
- CIE Proyectos ejecutados por la Corporación para la Investigación Energética 2002 – 2017, CIE, 2017b
- CIE Pirólisis por arco de plasma para obtención de energía a partir de residuos urbanos, Corporación para la Investigación Energética, Quito, 2010
- Dong Effect of Operating Parameters and Moisture Content on Municipal Solid Waste Pyrolysis and Gasification, J. Dong et al., Energy Fuels, 2016, 30 (5), pp 3994–4001, DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b00042
- EBE Rendición de Cuentas EBE EMAC-BGP Energy, Empresa Municipal de Aseo de Cuenca, 2014
<http://www.ebe.com.ec/portal/images/PDF/rdcebe2014.pdf>
- Garay Influencia de la generación distribuida en la red de distribución eléctrica – Caso práctico Central de biogás de Pichacay, F.P. Carpio Garay, Tesis, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, 2014
- Gershman Gasification of Non-Recycled Plastics from Municipal Solid Waste in the United States, Gershman Brickner & Bratton, Inc., 2013
- Hervin Feasibility analysis of gasification for energy recovery from residual solid waste in Humboldt County, K. Hervin, Energy Technology and Policy Tesis, Humboldt State University, 2013

Hu	Application of Fischer–Tropsch Synthesis in Biomass to Liquid Conversion, J. Hu et al, Catalysts 2012, 2, 303-326; doi:10.3390/catal2020303
INER	Estudio de Factibilidad Técnica, Financiera y Económica para el Proyecto “Implementación de una planta de procesamiento de basura mediante cogasificación para una población de 10,400 habitantes en el cantón Echenadía”, Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Quito, Marzo de 2015
MAE	Archivo SIG Rellenos Sanitarios y Botaderos – Escala 1:50,000, enlace WFS, Geoportal, Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador, 2017
MAE	Priorización para la Secretaría Nacional de Planificación (SENPLADES) del Proyecto: Gestión Integral de Desechos Sólidos, Ministerio del Ambiente, 2015
MAE	“GUÍA DE BUENAS PRÁCTICAS AMBIENTALES PARA REDUCCIÓN DE HUELLA ECOLÓGICA. “Hacia Una Gestión Sostenible en Universidades y Escuelas Politécnicas”. Primera edición, Quito- Ecuador, 2013.
MAE	Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos PNGIDS, Diagnóstico de la Cadena de Gestión Integral de Desechos Sólidos-Reciclaje, Quito, 2015. http://www.vicepresidencia.gob.ec/wp-content/uploads/2015/08/Resumen-Cadena-de-Gestion-de-Residuos-S%C3%B3lidos.pdf
MAG	Archivos SIG Botaderos y Rellenos Sanitarios, enlace WFS, Geoportal, Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2017 http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/geoserver/wfs
Maya	Gasification of Municipal Solid Waste for Power Generation in Brazil, a Review, D. Maya et al., J. Chem. Chem. Eng. 10 (2016) 249-255, doi: 10.17265/1934-7375/2016.06.001
Miño	Modelo de gestión de participación público-privado para proyectos energéticos rurales, S. Sánchez Miño, INER Congreso Nacional y Exposición científica, Quito, Noviembre 2015
Miño	Proyecto de Generación de Energía por Medio de Gasificación de Cuesco de Palma Africana en Santo Domingo, S. Sánchez Miño, Gerente General EnerPro Cía Ltda, AHK, Seminario Bioenergía Guayaquil, 2016 http://ecuador.ahk.de/fileadmin/ahk_ecuador/Uploads-Webseite/Dienstleistungen/Dokumente/Projekte/2016/AHKGyeBiomasaCuescoPalmaSSanchez180816.pdf
Narváez	Potential of Waste-to- Energy Implementation in Ecuador, R. Narvéz et al., International Journal of Energy Engineering 2013, 3(6): 279-286 DOI: 10.5923/j.ijee.20130306.01
Narváez	Dynamic modelling of up-draft gasifiers: incidence of feedstock quality and operational variables in the transient model structure, R. Narvéaz et al.,

Proceedings of the ASME 2017 Dynamic Systems and Control Conference, DSCC2017-5142, October 11-13, 2017, Tysons, Virginia, USA

Pazmiño Informe Ejecutivo - Consultoría para la realización de un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos domésticos y asimilables a domésticos para el Distrito Metropolitano de Quito, Marcelo Castillo Pazmiño, Quito, Julio 2012

PNGIDS Base de datos sobre residuos sólidos urbanos, Ministerio del Ambiente- Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos PNGIDS, 2017

Ramos Análisis comparativo de la carbonización de cuesco de palma de aceite en reactores de lecho fijo, Ramos et al., Revista Tecnura, 20(49), 45-58. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a03, 2016
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/10971/11898>

Reciclar <http://reciclar.com.ec/comprar-recicladados-clasificacion-de-papel-medio-ambiente-ecuador.php>, 2017

Rivera Ingeniería conceptual, básica, de detalle y simulación para el sistema de aprovechamiento del alquitrán en el proceso de gasificación up-draft con capacidad de 50 kg/h utilizando los RSU para el INER, D. Rivadeneira Rivera, Tesis, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Abril 2014

SIPA Cadenas Agroproductivas (Descargas), Sistema de Información Pública Agropecuaria, Ministerio de Agricultura y Ganadería de Ecuador, 2017
<http://sinagap.agricultura.gob.ec/index.php/productos/cadenas-agroproductivas>

Soni Gasification – A Process for Energy Recovery and Disposal of Municipal Solid Waste, V. Soni et al., American Journal of Modern Energy, Volume 2, Issue 6, December 2016, Pages: 38-42
<http://article.sciencepublishinggroup.com/html/10.11648.j.ajme.20160206.11.html>

SwissContact GIRS Municipal: Gestión Integral de Residuos Sólidos en 5 Municipios del Oriente y del Sur de Ecuador - Informe de Sistematización de Experiencias, Swiss Contact Ecuador, Abril 2014

Tan Feasibility Study on Solid Waste to Energy Technological Aspects, Yuzhong Tan College of Engineering University of California, Berkeley Fung Technical Report No. 2013.04.15, 2013
<http://funginstitute.berkeley.edu/wp-content/uploads/2014/01/SolidWasteToEnergy.pdf>

Tsiamis Determining accurate heating values of non-recycled plastics (NRP), Demetra A. Tsiamis and Marco J. Castaldi, Earth Engineering Center, City College City University of New York, Marzo 2016

- WEC World energy Resources – Waste to energy, World energy Council, 2016
https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Waste_to_Energy_2016.pdf
- WSP Waste technologies: waste to energy facilities – A report for the Strategic Waste
Infrastructure Planning (SWIP) Working Group, WSP Environmental Ltd, Mayo
2013