



Estado Plurinacional de Bolivia
Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas
Dirección General de Energías Alternativas



Imagen: Archivo GIZ/ Botadero Municipal de Potosí

Evaluación del potencial de generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en las zonas urbanas y semiurbanas de las ciudades de Sucre y Potosí

Gestión 2019

MINISTERIO DE
ENERGÍAS

PROGRAMA DE ASISTENCIA TÉCNICA DE LA COOPERACIÓN ALEMANA AL DESARROLLO

La Cooperación Alemana al Desarrollo a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y su Programa de Energías Renovables (PEERR) tiene como objetivo brindar asistencia técnica a través del Ministerio de Energías (MEN) a las entidades del sector eléctrico en el área técnica, normativa y formación de capacidades para el desarrollo de las Energías Renovables (EERR) y Eficiencia Energética (EE).

En este contexto, la información contenida en este documento es de carácter referencial y no representa necesariamente la política institucional del Ministerio de Energías ni de las entidades del sector eléctrico.



Implementada por:





Estado Plurinacional de Bolivia
Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas
Dirección General de Energías Alternativas



Imagen: Archivo GIZ/ Botadero Municipal de Potosí

Evaluación del potencial de generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en las zonas urbanas y semiurbanas de las ciudades de Sucre y Potosí

Gestión 2019

MINISTERIO DE
ENERGÍAS

PROGRAMA DE ASISTENCIA TÉCNICA

Entre el:

Ministerio de Energías

y

Deutsche Gesellschaft für Internationale

Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Implementada por:

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

La Paz – Bolivia

2019

RESUMEN EJECUTIVO

La generación de residuos es un problema que las autoridades deben solucionar en el corto tiempo, puesto que, cada día se genera una importante cantidad de residuos, y cuya disposición inadecuada genera impactos negativos sobre el medioambiente y la salud de la población. El presente estudio muestra métodos alternativos más adecuados y que resultan ser más sostenibles, y están basados en la valorización de los residuos.

Los municipios de Sucre y Potosí, que fueron objeto del estudio, muestran un manejo tradicional en la disposición de sus residuos sólidos mediante rellenos sanitarios y vertederos abiertos. Sin embargo, se pudo apreciar que, en las áreas periurbanas de estos municipios, es práctica común, la incineración de residuos. El manejo y el uso de los residuos urbanos y semiurbanos pueden ser un punto de partida para planificar un manejo integral para los residuos sólidos urbanos.

El estudio cuantificó los potenciales de energía del biogás a partir de los residuos orgánicos generados en ambos municipios. Se estimó que podrían producirse alrededor de 1.825.620 m³ de metano equivalente a 933 kW de potencia eléctrica instalada para Potosí y 3.360.418 m³ de metano equivalente a 1.800 kW de potencia eléctrica instalada para Sucre, si se aplica procesos de biodigestión a los residuos orgánicos generados, esto correspondería a un ahorro anual de al menos 200.000 toneladas de CO₂ equivalente.

Asumiendo que los precios de la energía eléctrica para el sector industrial están alrededor de 1 Bs/kWh la producción de biogás a partir de los residuos orgánicos, se podría ahorrar hasta 8.000.000 Bs anuales en Potosí y hasta 14.000.000 Bs en Sucre en un año. Ambos potenciales están en el rango donde la Digestión Anaerobia puede aplicarse y la tecnología está disponible en el Mercado internacional.

Para utilizar la tecnología, el estudio recomienda la implementación de un sistema para la separación en el origen de los residuos sólidos urbanos, y para los residuos industriales y comerciales.

- En Potosí el nuevo relleno sanitario en Paranturí tendrá una separación semimecánica de compuestos orgánicos para compostaje, y la tecnología del biogás podría ser implementada para reducir la demanda de energía en el lugar, reducir el tiempo y el espacio necesitado para el compostaje, y crear valores añadidos a partir de las ventas de energía eléctrica y térmica.
- En Sucre, ya existen los proyectos para la separación en el origen a partir de los productores individuales para suministrar una pequeña instalación de compostaje. La experiencia actual podría ser empleada para introducir una separación general de los compuestos orgánicos y otros materiales de valor, y preparar una implementación de la tecnología del biogás a mediano plazo.

- El matadero de Teja Tambo (Potosí) tiene residuos suficientes para proveer a una pequeña planta de biogás. Este sitio podría ser usado como una planta piloto para mejorar el conocimiento sobre el biogás y mostrar la factibilidad de la tecnología en Bolivia.

La implementación de un sistema de recogida selectiva para componentes orgánicos y otros recursos reciclables no solo permitiría el tratamiento anaerobio de la fracción orgánica para producir energía y fertilizante, sino también tendría efectos positivos adicionales:

- Reducción de los volúmenes de residuos a ser tratados en rellenos sanitarios y por tanto esta solución tradicional podría ser empleada por más tiempo alargando su vida útil, disminuyendo la cantidad de nuevos emplazamientos.
- Mejoría de las condiciones de trabajo para los trabajadores en los rellenos sanitarios (disminución de la contaminación microbiológica, y de malos olores, etc.).
- Reducción intensiva de emisiones de gases de efecto invernadero desde los rellenos sanitarios debido a una significativa menor cantidad de compuestos orgánicos en los residuos vertidos.
- Disminución de la contaminación ambiental debido a los lixiviados. Por lo tanto, es altamente recomendable implementar los siguientes pasos:
 - Mejorar la información sobre el manejo de residuos, el reciclado, la separación en el origen, el uso del compost/digestato y los beneficios medioambientales a todos los niveles (desde las escuelas hasta los ministerios).
 - Desarrollo de los sistemas de recogida para la separación en el origen.
 - Construcción de plantas de biogás a escala piloto para el tratamiento de residuos orgánicos para aumentar el conocimiento sobre el tema y preparar la implementación a escala industrial.
 - Ajuste del marco legal para apoyar la utilización de fertilizantes orgánicos y la reducción de gases de efecto invernadero (GEI).

Los costos de inversión presentados en las tablas 8 y 9 del estudio, estiman 31.000.000 Bs. para Potosí y 54.500.000 Bs. para Sucre. Debido a la falta de información sobre los costes de inversión en Bolivia para esta tecnología, en el cálculo se utilizaron precios de referencia, en Alemania se tiene un costo de 3,096 EUR por kW de capacidad de cogeneración eléctrica instalada (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe Biogasmess programm 2, 2009).

Se asumen que los costos de pretratamiento asciendan a un valor aproximado de 11% de los costos de inversión de las plantas de biogás. Los costos de inversión en Bolivia serán menores que este valor (11%) debido a los menores costos de adecuación del terreno, concreto y mano de obra y los costos

adicionales de los derechos de importación e impuestos sobre el equipo técnico.

Con la información recopilada durante el estudio, no se pudo estimar los ingresos procedentes de la venta de electricidad la falta de información sobre los precios de la electricidad, la cantidad de autoconsumo, los impuestos, etc, son limitantes para efectuar este cálculo. Sin considerar todos estos factores, se puede estimar una producción de electricidad de 8.000.000 y 14.000.000 kWh para Potosí y Sucre respectivamente, lo que resulta en un ingreso de 8.000.000 Bs y 14.000.000 Bs por año, asumiendo precios de electricidad para la industria de alrededor de 1 Bs /kWh, que SEPSA y CESSA proporcionaron para el mes de agosto de 2018. Para la producción de electricidad en una central de cogeneración se asumieron 8.000 horas a plena carga al año.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	METODOLOGÍA	4
2.1	Instrumentos Metodológicos	4
2.2	Trabajo de campo.....	4
3	GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS	6
3.1	Gestión de Residuos Sólidos en el Municipio de Potosí.....	6
3.2	Gestión de Residuos Sólidos en el Municipio de Sucre.....	7
3.3	Muestras de laboratorio analizadas.	8
3.4	Barreras en la evaluación del potencial.....	10
4	RESEÑA DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE LA TECNOLOGÍA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU).	12
4.1	Recogida.....	12
4.2	Pre y Pos-tratamiento	14
4.3	Tecnologías anaerobias apropiadas.....	17
4.4	Requerimiento de calidad del producto final.....	21
4.5	Estudio de caso 1: El proyecto de biogás de la BSR – Biometano a partir de Residuos Orgánicos; Berlín; Alemania.....	22
4.6	Estudio de caso 2: Manchester Bredbury Parkway (Reino Unido). ...	23
5	POTENCIAL DE BIOGÁS EN POTOSÍ Y SUCRE.	24
5.1	6.1. Municipio de Potosí.....	24
5.2	Municipio de Sucre.....	29
6	FACTIBILIDAD TÉCNICA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN LAS CIUDADES DE SUCRE Y POTOSÍ.	34
6.1	Tratamiento de residuos orgánicos recogidos selectivamente.....	34
6.2	Tratamiento de residuos sólidos urbanos mezclados.....	36
6.3	Tratamiento de residuos orgánicos de fuentes seleccionadas desde los productores individuales, por ejemplo, los residuos del matadero de Potosí.....	36
7	CONCLUSIONES.	39
8	LITERATURA RECOMENDADA.	42

ABREVIATURAS

AAPOS	Administración Autónoma para Obras Sanitarias
CSTR	Continuous Stirred Tank Reactor (Reactor Continúo Agitado)
CPV	Censo Nacional de Población y Vivienda
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EMAS	Entidad Municipal de Aseo Urbano Sucre
EMAP	Entidad Municipal de Aseo Urbano Potosí
FANCESA	Fábrica Nacional de Cemento S.A
FORSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
GAM	Gobierno Autónomo Municipal
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GIRS	Gestión Integral de Residuos Sólidos
INE	Instituto Nacional de Estadística
MBT	Mechanical-Biological Treatment (Tratamiento Mecánico-biológico)
MS	Materia Seca
MF	Materia Fresca
kW	kilovatios
kWh	kilovatios-hora
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
ST	Sólidos Totales
SV	Sólidos Volátiles

1 Introducción

El Viceministerio de Electricidad y Energía Alternativa (VMEEA) dependiente del Ministerio de Energía, con el apoyo de la Cooperación para el Desarrollo de Alemania (GIZ) a través del Programa de Energías Renovables (PEERR), dentro del marco del Plan Estratégico de Asistencia Técnica y en coordinación con el sector eléctrico de Bolivia, planea implementar actividades que buscan mejorar las condiciones técnicas, económicas, legales e institucionales para la integración de las energías renovables (EERR) para el Sistema eléctrico y para el desarrollo de la eficiencia energética (EE).

La generación de residuos es un problema que la ciudadanía tiene que enfrentar. La sociedad civil y las industrias generan residuos diariamente que no siempre tienen una adecuada disposición final, generando impactos negativos sobre el medioambiente y sobre la salud de la población. Sin embargo, existen otras alternativas de manejo de estos que son mucho más recomendables y sostenibles, tales como: el reúso, el reciclado y la valorización energética.

Los municipios de Sucre y Potosí muestran un manejo tradicional en la disposición de sus residuos sólidos mediante rellenos sanitarios y vertederos abiertos. Adicionalmente, en áreas periurbanas se practica comúnmente la incineración de residuos. El manejo y el uso de los residuos urbanos y semiurbanos pueden ser un punto de partida para la planeación de un manejo integral para los residuos sólidos urbanos.

La explotación de nuestros recursos naturales ha alcanzado un nivel crítico y provoca daños significativos al clima y al medioambiente. Los recursos primarios, el medioambiente, y el clima, se pueden salvar si en lugar de solo disponer los residuos orgánicos los mismos se utilizan como recursos secundarios de valor añadido, siendo su recuperación más eficiente si todo el material y su potencial energético son utilizados. La implementación de la Digestión Anaerobia y la producción de biogás en el tratamiento de residuos orgánicos permite la recuperación tanto de energía y como de nutrientes, y reduce impactos negativos al medioambiente tales como emisiones no controladas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y la contaminación de aguas subterráneas por medio de la lixiviación en vertederos.

La evaluación de potencial realizado en base a la información relevada no proporcionó suficiente información para tomar una decisión final sobre la tecnología más apropiada a ser utilizada. En particular, falta mayor información sobre los aspectos financieros y los costes de inversión. Sin embargo, cabe señalar que en muchos países los sistemas de gestión de residuos se están desarrollando en base a sistemas de separación de residuos en origen, reciclado e incineración y vertido de los residuos restantes. Por lo tanto, una combinación de diferentes tecnologías puede ser lo más

recomendable. Además, los municipios de Sucre y Potosí no pueden ser vistos individualmente y deberían formar parte de una estrategia nacional de gestión de residuos.

Tabla 1: Ventajas y desventajas del uso de tecnologías para el aprovechamiento de residuos orgánicos

Tipo de tecnología	Ventajas	Desventajas
Vertedero sin recogida de gases	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo - Operación simple 	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere grandes extensiones para su emplazamiento. - Emisiones GEI - Peligros para la salud de la población circundante - Escasa aceptación social - Contaminación ambiental - Generación de olores y lixiviados
Vertedero con recogida de gas y lixiviados	<ul style="list-style-type: none"> - Recuperación de energía 	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere grandes extensiones para su emplazamiento. - Peligros para la salud de la población circundante - Escasa aceptación social - Generación de olores y lixiviados - Costes de implementación y operación elevados
Incineración	<ul style="list-style-type: none"> - Recuperación de energía - Reducción de volumen - Reducción de las emisiones de GEI 	<ul style="list-style-type: none"> - Costos de implementación y operación elevados - Cenizas tóxicas para verter en vertederos - Riesgo de emisiones tóxicas al medio ambiente
Separación en la fuente y tratamiento anaeróbico/biológico	<ul style="list-style-type: none"> - Reciclaje de recursos - Recuperación de energía - Reducción de las emisiones de GEI - Reducción del volumen de residuos - Recuperación de nutrientes 	<ul style="list-style-type: none"> - Establecimiento de un sistema de separación en la fuente - Costes elevados - Existe una pequeña cantidad de residuos que no puede reutilizarse y debe incinerarse o depositarse en vertederos

Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

La publicación "Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management" ayuda a los responsables de la toma de decisiones y a sus asesores a evaluar las oportunidades, límites y riesgos de las diversas tecnologías de tratamiento de residuos para una planificación eficaz y unas inversiones eficientes en la gestión de residuos.

https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf

2 Metodología

La evaluación de potencial se basó en metodología descriptiva -exploratoria, mediante las técnicas de la entrevista y de la observación no participante, durante las visitas a los dos municipios; particularmente, en aquellos lugares que eran potenciales espacios para la recolección de información de interés para el estudio. Esto permitió tener una aproximación directa con los lugares de interés y conocer experiencias y vivencias de los sujetos del universo seleccionado.

Asimismo, se apeló a la metodología cuantitativa, mediante la recolección de muestras de residuos orgánicos de los grandes generadores. Estas muestras recolectadas han permitido identificar diferentes variables que facilitaron el procesamiento de los datos obtenidos, para luego presentarlos en tablas, presentes en el documento.

2.1 Instrumentos Metodológicos

Descriptiva-exploratoria. La investigación descriptiva se realizó en las Empresas Municipales de Aseo Urbano (EMAP Potosí y EMAS Sucre); a partir de los datos e información bibliográfica secundaria obtenidos de ambos municipios y explicaciones más profundizadas en entrevista a especialistas o responsables de la Gestión integral de Residuos Sólidos (GIRS). La investigación exploratoria fue una entrevista abierta con preguntas y esclarecimientos. Con los datos proporcionados por el personal de ambas entidades, se realizó el análisis de los mismos de manera separada, por municipio.

Cuantitativo. Se realizó la toma de muestras de residuos orgánicos, en espacios e instituciones identificadas, considerados grandes generadores, en ambos municipios, para luego ser analizadas en laboratorio, a fin de determinar el contenido de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV), así como también la demanda química de oxígeno (DQO) de muestras líquidas; todo aquello, para establecer el contenido de compuestos orgánicos en las distintas muestras.

2.2 Trabajo de campo

El trabajo de campo se ejecutó en los municipios de Potosí y Sucre respectivamente, entre los meses de febrero y marzo de 2019.

- La investigación se desarrolló de forma procesual, a través de las siguientes actividades y se concentró en la gestión de residuos orgánicos y la producción de los grandes generadores, en los dos municipios objeto de estudio.

- Visita a instituciones públicas y privadas para recolección de datos e información;
- Entrevistas, reuniones y coordinación de actividades con personal clave de instituciones públicas y privadas;
- Toma de muestras y análisis de laboratorio;
- Sistematización y análisis de la información.

Municipio de Potosí

Primera fase: Visita al municipio; reuniones de coordinación y entrevistas con personal del Gobierno Autónomo Municipal de Potosí, Empresa Municipal de Aseo de Potosí (EMAP), La Administración Autónoma para Obras Sanitarias (AAPOS) de Potosí, y otras organizaciones y empresas privadas, relacionadas con el objeto de estudio.

Segunda fase: Trabajo de Campo, toma de muestras de residuos orgánicos en: Mercados de abasto (Uyuni, Central, Campesino, Calvario, Villa Betanzos); Cervecería Potosina; Cementerio General, Botadero Municipal de Karachipampa y Matadero Teja Tambo.

El trabajo de campo se desarrolló en el área urbana y periurbana del municipio de Potosí.

Municipio de Sucre

Primera fase: Visita al municipio; reuniones de coordinación y entrevistas con personal del Gobierno Autónomo Municipal de Sucre, Entidad Municipal de Aseo Sucre (EMAS), Empresa Local de Agua Potable y Alcantarillado Sucre-ELAPAS, y otras organizaciones y empresas privadas, relacionadas con el objeto de estudio.

Segunda fase: Trabajo de Campo, toma de muestras de residuos orgánicos en: Mercados de abasto (Campesino, Morro, Central); Cervecería Sureña; Cementerio General, Centro de Compostaje de EMAS, Planta de Aguas Residuales-ELAPAS.

El trabajo de campo se desarrolló en el área urbana y periurbana del municipio de Sucre.

3 Gestión de Residuos Sólidos

La gestión de residuos sólidos en Bolivia tiene pocos avances, se denota la falta de sistemas de separación en origen y recolección diferenciada para el aprovechamiento y reciclaje de los residuos que se generan en los diferentes municipios.

De los dos municipios objeto de estudio, solo el Municipio de Sucre ha implementado proyectos pilotos para el aprovechamiento de sus residuos a través del compostaje y lombricultura para los residuos orgánicos.

3.1 Gestión de Residuos Sólidos en el Municipio de Potosí.

Para el año 2019, el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2018) proyectó que la población en el Municipio de Potosí sería de 216.931 habitantes. De acuerdo con datos de la Empresa Municipal de Aseo de Potosí (EMAP), actualmente, se generan 78,25 t/día, equivalentes a 28.171,39 t/año de residuos en el municipio, de los cuales el 43,5% corresponden a residuos orgánicos, el 45% a residuos reciclables y finalmente el 11,5% a otro tipo de residuos.

La modalidad de gestión y administración de los servicios de aseo urbano es descentralizada, la cual está únicamente a cargo de la Empresa Municipal de Aseo Potosí (EMAP).

La prestación de servicios que EMAP ofrece son: Barrido y limpieza de áreas públicas; recolección y transporte de residuos sólidos; disposición final de residuos sólidos en el botadero controlado.

Los tipos de residuos que se recogen son: Comunes (orgánicos e inorgánicos), hospitalarios e industriales. En el Municipio de Potosí, no existe un sistema aplicado de recolección diferenciada de residuos.

La eliminación y disposición final de residuos sólidos urbanos se realizan mediante el método de vertido y confinamiento definitivo en el Botadero controlado de Karachipampa.

Por las características de manejo y confinamiento que se realiza en el día; se cuenta con chimeneas para el escape de gases, pero no se tiene un sistema de captura o colector de estos gases, actualmente se viene realizando la quema de este gas bajo control y supervisión de personal técnico de EMAP.

Con el objetivo de mejorar la gestión integral de residuos sólidos, el Municipio de Potosí desarrolló un proyecto nuevo de Relleno Sanitario y Planta de clasificación. La infraestructura está ubicada en zona de Paranturi, la misma que se encuentra en etapa de inversión.

3.2 Gestión de Residuos Sólidos en el Municipio de Sucre.

El Municipio de Sucre, se encuentra ubicado en la Provincia Oropeza del Departamento de Chuquisaca, cuya población estimada para el año 2019 es de 291.819 habitantes (INE, 2018).

De acuerdo con datos e información de la Entidad Municipal de Aseo Sucre (EMAS), se estima que la generación de residuos sólidos es de 206,20 t/día y la generación anual esta alrededor de 75.263 t/año. Al respecto, se establece que los residuos municipales en el Municipio están compuestos por un 60,56% de residuos orgánicos, un 9,05% de residuos reciclables y por último un 30,39%, de otro tipo de residuos.

El servicio de aseo urbano en el Municipio está a cargo de EMAS, empresa descentralizada, responsable de la gestión administrativa y operativa de los servicios de aseo urbano, que ofrece los servicios de: Barrido y limpieza de áreas públicas, recolección y transporte, y la disposición final de residuos sólidos en el botadero controlado.

De acuerdo con la información de EMAS, se tiene actualmente proyectos piloto para separación y recolección diferenciada de residuos sólidos, los cuales comenzaron el año 2015 con una Planta piloto de compostaje, ubicada en el ex botadero La Esperanza.

Se inició con la recolección residuos orgánicos desde puntos estratégicos (mercados, cementerio general, matadero, entre otros), gradualmente se fueron incrementado nuevos lugares de recolección, de manera simultánea donde se efectúa un trabajo de concientización y educación a la población en general.

A partir del mes de enero del presente año, se inició la recolección diferenciada en el barrio Santa Clara de la ciudad de Sucre (proyecto piloto), con la participación de aproximadamente 318 familias, con un promedio de 5 integrantes por familia; se tienen más de 50 centros comerciales, restaurantes, cafeterías, heladerías, hoteles, alojamientos y otros comercios, donde se realiza la recolección diferenciada de residuos sólidos, de acuerdo a un cronograma establecido, con frecuencias, días y horas diferentes, según el tipo de residuos.

La eliminación y disposición final de residuos sólidos urbanos se realizan mediante el método de vertido y confinamiento definitivo en el Botadero controlado de Lechuguillas. Para la captura de gases se tienen instaladas chimeneas, los cuales son quemados para evitar la contaminación atmosférica.

El botadero de Lechuguillas actualmente viene funcionando como un botadero controlado, cumpliendo la Normativa vigente, respecto a la captación de lixiviados.

Según información de EMAS, el botadero se encuentra en proceso de transformación para convertirse en relleno sanitario, cumpliendo con todas las características técnico-ambientales.

3.3 Muestras de laboratorio analizadas.

Se analizaron las siguientes muestras en el Instituto de Investigación de Procesos Químicos (IIDEPROQ) de la Universidad Mayor de San Andrés:

Figura 1: Análisis de muestras en los Municipios de Sucre y Potosí

IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS			
PROCEDENCIA	MUESTRA	CÓDIGO	FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS
POTOSÍ	Cervecería (bagazo)	M-1	26-02-2019
	Karachipampa - Botadero arriba	M-2	
	Karachipampa - Botadero abajo	M-3	
	Matadero (rumen)	M-4	27-02-2019
	Matadero (sangre)	M-5	
	Cementerio - plantas	M-6	
SUCRE	Cementerio: plantas y flores	M-7	07-03-2019
	Centro de compostaje	M-8	08-03-2019
	PETAR-ELAPSAS: tanque imhoff	M-9	
	Planta aguas residuales	M-10	
	Cervecería (bagazo)	M-11	
	Mercado central	M-12	

RESULTADOS													
PARÁMETROS	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10	M-11	M-12	METODOLOGÍA
SÓLIDOS TOTALES % (BASE HÚMEDA)	17.6	4.46	3.52	12.7	14.9	23.4	46.3	14	5,6	68.5	23.8	12.6	SÓLIDOS TOTALES 2540 G SMWW
SÓLIDOS VOLÁTILES % (BASE SECA)	73.7	51	51.1	88.4	88	73.3	75.3	82.8	52.5	29.4	71.8	55.3	SÓLIDOS VOLÁTILES 2540 G SMWW

PARÁMETRO	M-2	M-3	M-5	MÉTODO
DQO [mg/l]	12030	8300	18240	HACH Method 8000

Fuente: Elaborado por Instituto de Investigación de Procesos Químicos – UMSA

Se analizaron muestras sólidas para determinar el contenido de sólidos totales y volátiles y muestras líquidas para la demanda química de oxígeno (DQO) para determinar el contenido de orgánicos en las muestras. El contenido de sólidos describe el contenido de agua en la muestra, puede fluctuar fuertemente entre diferentes muestras de la misma fuente, y por lo tanto tiene un gran impacto en el potencial final de biogás.

A partir de esta información se puede estimar la producción potencial de biogás para diferentes residuos. Las siguientes listas ofrecen algunos ejemplos de potenciales de metano:

Tabla 2: Estimación de potencial de biogás de las muestras

	Rendimiento específico de biogás	Contenido de metano
	l/kg VS	%
Granos de cervecería de cerveza	530	59
Sangre, líquida	685	70
Estiércol de ganado	450	55
Sobras de la cocina bajas en grasa	640	60
Residuos orgánicos	615	60
Estiércol de cerdo	400	60
Purín de cerdo	400	60
Contenido del rumen	480	55
Lodos de depuradora	525	60
Contenido estomacal	420	55
Residuos vegetales	500	56
Suero de leche fresco	750	53

Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

La DQO se determinó en las muestras líquidas, pero no se utilizó para la estimación del potencial de biogás porque no se disponía de volúmenes de lixiviados de vertedero y la producción de biogás a partir de lixiviados de vertedero no formaba parte del estudio.

Este método de estimación se eligió un método rápido y barato en comparación con los ensayos por lotes de biogás en laboratorio y los análisis elementales. Se decidió que el nivel de precisión es satisfactorio para los fines del estudio.

No se realizó una caracterización de las muestras de residuos en cuanto a su composición o composición elemental debido al tiempo limitado para el estudio y a la falta de necesidad. Un estudio representativo sobre la composición de los residuos necesita varios meses para cubrir los cambios estacionales y garantizar un número suficiente de muestras.

3.4 Barreras en la evaluación del potencial.

La investigación también identificó barreras en forma general que han impedido una adecuada gestión de residuos sólidos, en los dos Municipios de objeto de estudio, las cuales se resumen de la siguiente manera:

Aspectos Normativos: falta de normativa específica, los GAM de Potosí y Sucre, aún no han elaborado su reglamentación, con base al establecido en la Ley 755 de Gestión Integral de Residuos.

Aspectos económicos y financieros:

- Las Empresas de Aseo Urbano (EMAP y EMAS) son empresas que atraviesan por problemas económicos, debido a que no son entidades autosostenibles, aspecto que repercute en la falta de inversiones y recursos financieros para mejorar en la prestación de sus servicios.
- En los dos municipios, el presupuesto asignado no llega a cubrir las necesidades del sector principalmente en la previsión de inversiones como la renovación del parque automotor.
- En general, en los municipios de Potosí y Sucre, los ingresos recaudados por concepto de tasa de aseo sólo llegan a cubrir entre un 40 a 60% del total de costos; lo que ocasiona que los GAMs tengan que subvencionar los servicios de aseo urbano.

Aspecto de planificación y organización:

- Se evidencia la falta de planificación municipal y de instrumentos técnicos que orienten la implementación de la GIRS.
- En los GAMs y EMAs, de ambos municipios, se denota una carencia de componentes de gestión integral dentro su organización, tal es el caso de la planificación, educación ambiental, aprovechamiento de residuos y seguridad ocupacional, entre otros.
- Carencia de programas y proyectos para la separación, selección en fuente y la recolección diferenciada de residuos sólidos, aspecto esencial y fundamental para la valorización de los residuos orgánicos municipales.
- Existen deficiencias administrativas y de gestión en las operaciones.
- Carencia de recursos humanos especializados y capacitados para la gestión integral de residuos sólidos, y la prestación de servicios de aseo urbano.
- Falta de infraestructura y equipamiento adecuado para la gestión integral de residuos sólidos en ambos municipios, a decir de: Maquinaria, equipamiento, Centros de compostaje, Plantas de

tratamiento y/o aprovechamiento y finalmente, sitios de disposición final (rellenos sanitarios).

- En general, en ambos municipios existe carencia en la calidad de los servicios de aseo urbano, por parte de las EMAs.

Aspectos tecnológicos e Información:

- No existe estímulos al desarrollo tecnológico e investigación, se tiene Información limitada sobre la gestión de residuos orgánicos, a nivel municipal en las entidades públicas responsables, en centros de aprovechamiento, sitios de disposición final, principalmente relacionadas a:
 - Cantidades y características de generación de residuos sólidos;
 - Costos y tarifas de los servicios de aseo urbano (recolección, transporte; aprovechamiento y disposición final);
 - Cobertura de los servicios;
 - Costos de gestión y operación de servicios;
 - Montos de inversión;
 - Ingresos por la prestación de servicios y venta de materiales valorizables.
 - Se denota una alta burocratización en entidades públicas y privadas, para el acceso a datos e información sobre la gestión de residuos orgánicos en los municipios de Potosí y Sucre.

Aspectos sociales y comunicación:

- Se evidencia la falta de recursos que promuevan la participación de la población en la GIRS, existe la carencia de programas de sensibilización y concientización.
- Si bien el Municipio de Sucre, viene realizando algunas iniciativas de trabajo con estudiantes en las escuelas y colegios, estas acciones son mínimas, por la falta de presupuesto y recursos financieros.

4 Reseña del estado del arte sobre la tecnología de digestión anaerobia para la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU).

Existen varios factores que tienen un impacto significativo sobre la factibilidad y la funcionabilidad de los conceptos de la digestión anaerobia de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Algunos de los factores más importantes son:

- Recogida.
- Pre y pos-tratamiento (separación, pasteurización, y otros).
- Tecnología anaerobia seleccionada.
- Requerimientos de calidad de los productos finales (digestato, compost).

Es importante encontrar un sistema para la recogida que tenga aceptación entre los usuarios y fomente el comportamiento de una disposición adecuada.

El pre-tratamiento depende de las características del residuo y de la calidad requerida para la tecnología seleccionada, algunas son más sensibles a las impurezas que otras. También es importante evaluar si se puede producir suficiente energía o no para que sea rentable la propuesta.

Si los residuos están mezclados, y no tienen un alto contenido orgánico, puede ser mejor simplemente estabilizar los residuos orgánicos por medio del compostaje, como se realiza en una planta mecánico-biológica, para poder disponer de forma segura dichos residuos en un vertedero. La selección del tratamiento y la tecnología tienen que considerar también el uso final de sus productos.

Si el digestato o el compost se usan en la agricultura, se debería asegurar que estos tengan la menor cantidad posible de impurezas y patógenos. Una mejor calidad significa un mejor precio para el producto y mayor aceptación entre los agricultores.

4.1 Recogida.

La recogida selectiva siempre mejora considerablemente la calidad de los residuos orgánicos que pueden ser usados como sustrato para la digestión anaerobia, y también permite la separación de materiales reciclables tales como papel, plásticos, vidrios y otros.

Figura 2: Diferentes contenedores para Residuos Sólidos Urbanos (RSU), residuos peligrosos, vidrio, material empaquetado, papel u orgánicos



Fuente: www.wikipedia.org

Cuando se está considerando qué métodos usar es importante tener en cuenta lo siguiente:

- Accesibilidad e infraestructura existente (especialmente en pendientes o áreas estrechamente construidas).
- Costo del equipamiento.
- Costo del mantenimiento u operación.
- Aceptación del usuario (cantidad de esfuerzo y tasas).

El equipamiento puede variar desde carros, pequeños camiones hasta camiones profesionales para la recogida de residuos. Es importante considerar si es apropiado para la ruta de recogida, si puede ser financiado razonablemente y si se garantiza el mantenimiento. Este es especialmente el caso para vehículos importados para los cuales la adquisición de partes y piezas podría dificultarse o encarecerse.

Las tasas de recogida se deben evaluar basadas en qué es lo socialmente aceptable y qué motivaría a los usuarios a usar (pero no abusar) el sistema, por ejemplo, emplear tasas superiores para los residuos mezclados y tasas menores para los residuos orgánicos. Sin embargo, si hay una diferencia muy grande en las tasas es probable que los residuos mezclados sean dispuestos en el sistema para los residuos orgánicos.

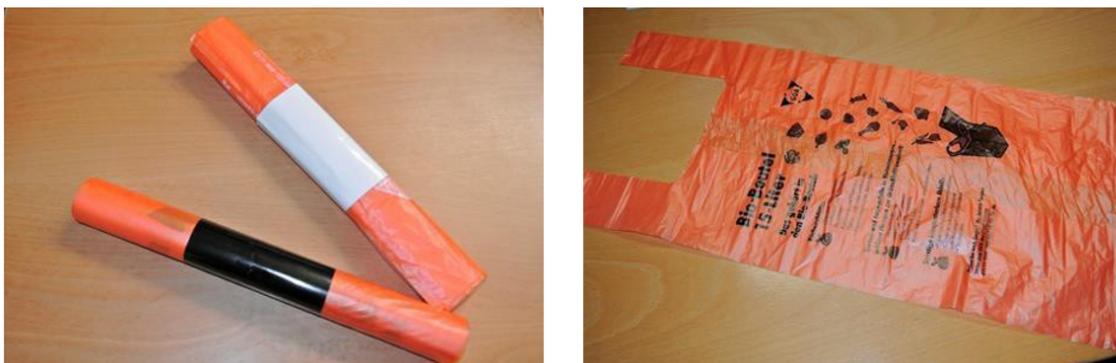
El sistema de recogida puede ser dividido a grandes rasgos en dos categorías:

- Sistemas "Individual", por ejemplo, dispositivos de recogida al lado de la acera para casas individuales.
- Sistemas "Centralizado", por ejemplo, un contenedor grande ubicado centralmente dentro de un vecindario o comunidad.

Los sistemas individuales tienen, típicamente, un nivel superior de pureza e índices de recuperación, pero son más costosos. En la mayoría de los lugares de Alemania, existen contenedores extras para el residuo orgánico, los cuales se vacían semanal o quincenalmente. En algunas partes de Italia, el residuo orgánico se recoge, muy a menudo, en contenedores pequeños. En áreas de Suecia y Dinamarca solo hay un contenedor para todos los residuos domésticos, pero se separan en diferentes bolsas de distintos colores, por ejemplo, las bolsas verdes para los residuos orgánicos y las negras para el resto de los residuos domésticos. Las bolsas verdes pueden ser clasificadas manual o automáticamente en el lugar donde se descargan los residuos. Una alternativa eficiente, y de menor costo, es la recogida selectiva de las bolsas que solo tienen los residuos orgánicos domésticos sin utilizar contenedores. Esto se puede realizar con un camión sencillo con una cama impermeable. Para evitar olores desagradables el empleo de camiones cerrados es la solución más adecuada.

Los sistemas "Centralizados" requieren menos logística, pero no son tan efectivos y tienen menor índice de recuperación. También son más susceptibles a la disposición inadecuada, debido a que es más difícil determinar quién es responsable de los residuos.

Figura 3: Ejemplos de las bolsas vendidas y usadas para recoger separadamente los residuos orgánicos en una municipalidad en la región sur de Alemania.



Fuente: Henry Forster: „Bioabfallerfassung im Ostalbkreis, Biobeutel statt Biotonne – Erfahrungen mit der Erfassung von Bioabfällen in Beuteln“, Präsentation GOA mbH

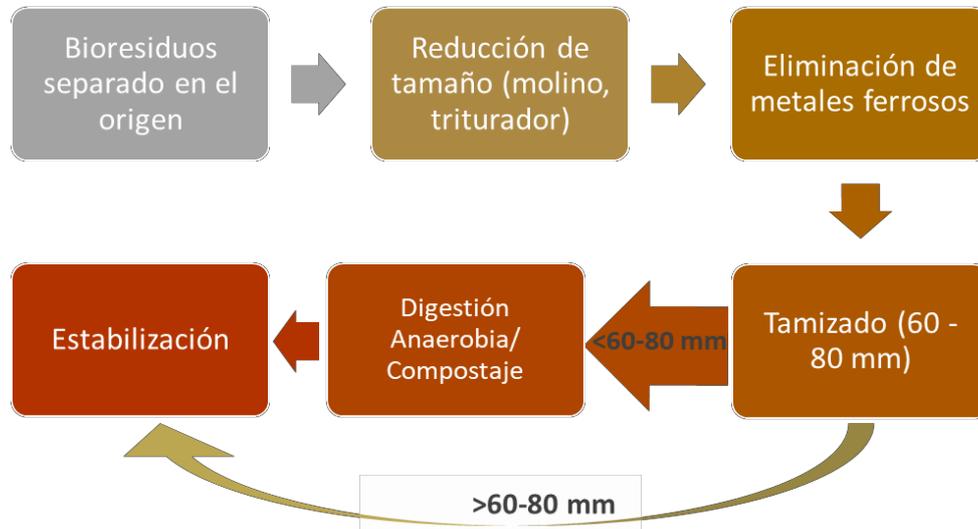
4.2 Pre y Pos-tratamiento

Existen diferentes tecnologías anaerobias, así como diferentes pre-tratamientos, los cuales son adecuados para los residuos orgánicos dependiendo de la composición del residuo. El residuo orgánico generalmente puede ser clasificado como sigue:

- Residuo orgánico doméstico separado en el origen (y potencialmente residuos de jardinería).
- Residuos orgánicos de jardines y parques.

- Residuos orgánicos industriales y comerciales desde la producción de alimentos, restaurantes, supermercados, etc.
- Residuos domésticos mezclados.

Figura 4: Etapas principales del pretratamiento mecánico, clasificación para bioresiduos separados en el origen



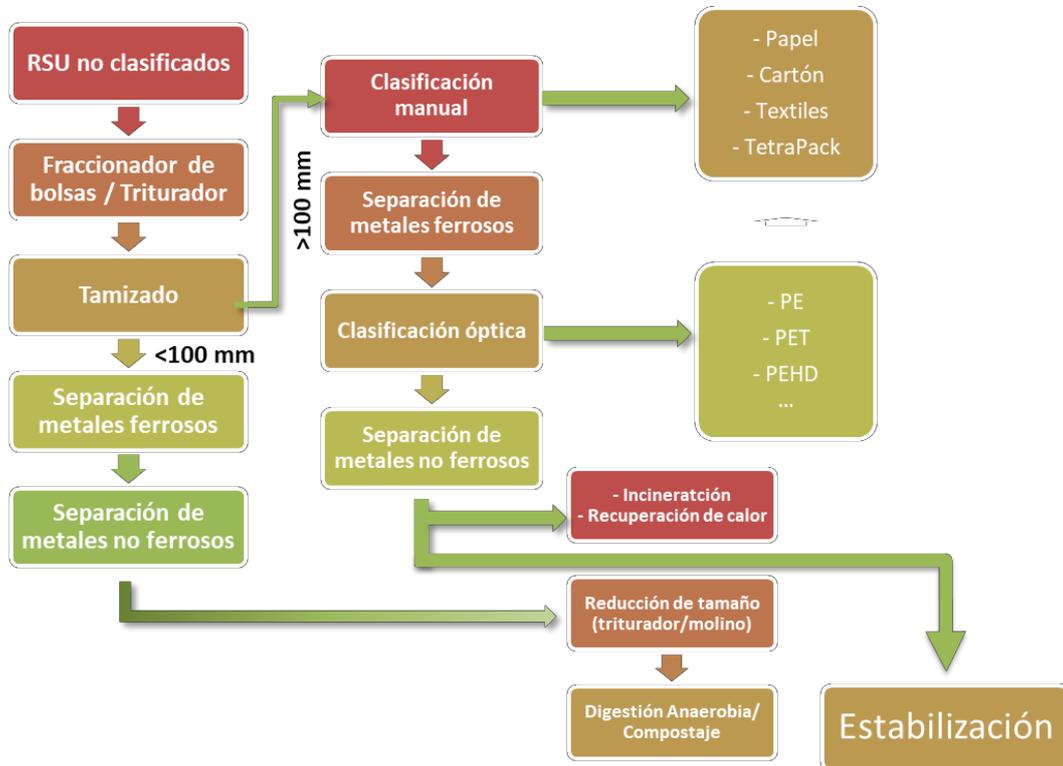
Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

El tratamiento difiere entre los residuos separados en el origen y los mezclados. Mientras el tratamiento de los residuos orgánicos separados en el origen es relativamente simple e incluye principalmente trituración y clasificación mediante tamices de tambor (figura 3), el tratamiento mecánico de los residuos mezclados es más complicado y más costoso. Además de la clasificación manual se usa equipamiento para la clasificación óptica y el tamizado para la eliminación del material reciclable (papel, cartón, plásticos, metales, entre otros) y la separación de la fracción orgánica (figura 4).

Otra opción para el tratamiento de los residuos mezclados es el proceso de la compañía BTA International GmbH. El proceso BTA es para el tratamiento mecánico-biológico de residuos. Este facilita la eliminación eficiente de las impurezas, así como la transferencia completa de los componentes orgánicos biodegradables a una suspensión orgánica para la posterior digestión anaerobia (figura 5). En el proceso BTA® la materia prima se añade al proceso de mezclado con agua para separar la mezcla del residuo en fracciones aprovechando las fuerzas de sedimentación y flotabilidad natural. Además, los componentes orgánicos no solubles se reducen a fibras por medio de fuerzas de cizallamiento y pasan a ser parte de la suspensión. De esta forma, los materiales pesados se apartan y los materiales ligeros se extraen. En total, se separan con efectividad tres fracciones.

- Materiales orgánicos biodegradables
- Fracción ligera: plásticos, textiles, madera, láminas de plásticos, y otros
- Fracción pesada: piedras, huesos, baterías, y otros

Figura 5: Principales etapas del pre-tratamiento mecánico / clasificación para Residuos Sólidos Urbanos (RSU) mezclados



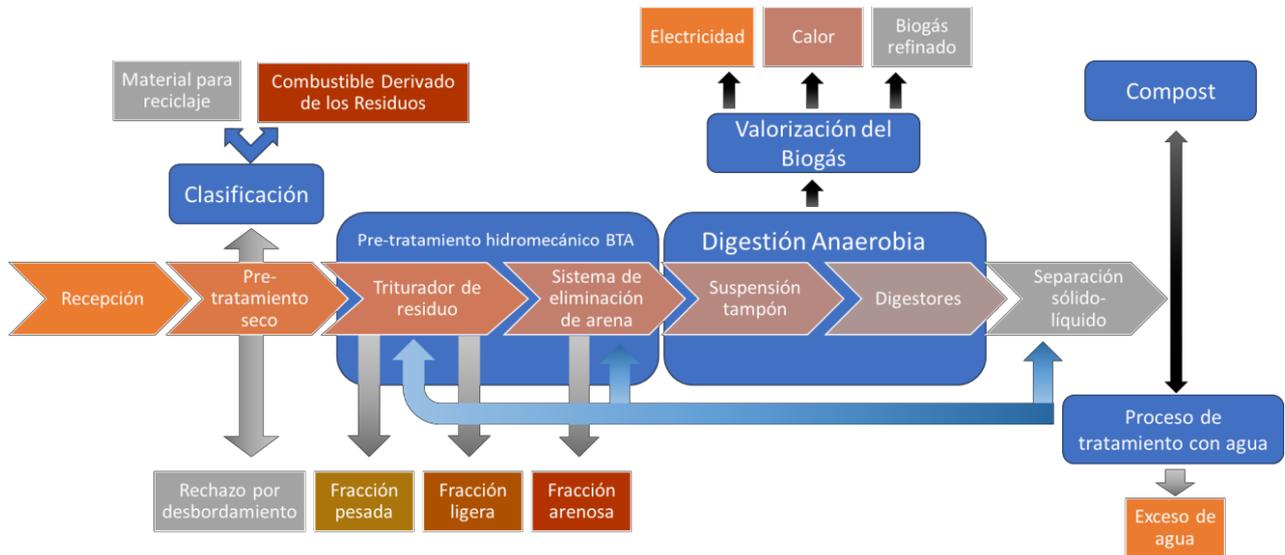
Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

La figura 6 muestra el proceso BTA, el cual se puede utilizar para residuos domésticos mezclados no clasificados con alto contenido orgánico como una planta mecánico-biológica. Las plantas mecánico- biológicas tienen, típicamente, un abridor de bolsas, una sección de clasificación, una separación de metales (chatarra ferrosa) antes de que el residuo orgánico se trate biológicamente. El nivel tecnológico de este proceso es relativamente alto, pero es muy flexible y podría ser considerada en aquellos casos, en los cuales la implementación de la separación en el origen de los residuos sea demasiado difícil o costosa. Para los residuos separados en el origen el nivel necesario de pre-tratamiento depende de la tecnología de digestión anaerobia implementada.

Para los reactores de flujo pistón figura 8 es mejor si el residuo se corta a tamaño de partícula de alrededor de 60 mm. También se recomienda la separación mecánica usando un tamizado en estrella o un separador magnético. El residuo separado en el origen también se puede fermentar con poco o sin pre-tratamiento en fermentadores tipo *Garage* (por percolación) figura 8 debido a que éstos no tienen un equipamiento sensible.

La pasteurización de residuo orgánico también es una etapa altamente recomendada, especialmente si el producto final es para uso en la agricultura. Un posible método es el tratamiento anaerobio termofílico (55°C) por 2 o 3 semanas. Para la fermentación húmeda otro método es la pasteurización en tanques los cuales calientan el material a 70°C por al menos una hora. Para la fermentación seca un método típico es el compostaje por 2 o 3 semanas después de la fermentación. Estos son métodos confiables para obtener un digestato libre de patógenos (fertilizante orgánico).

Figura 6: El proceso BTA para corrientes de residuos no clasificado

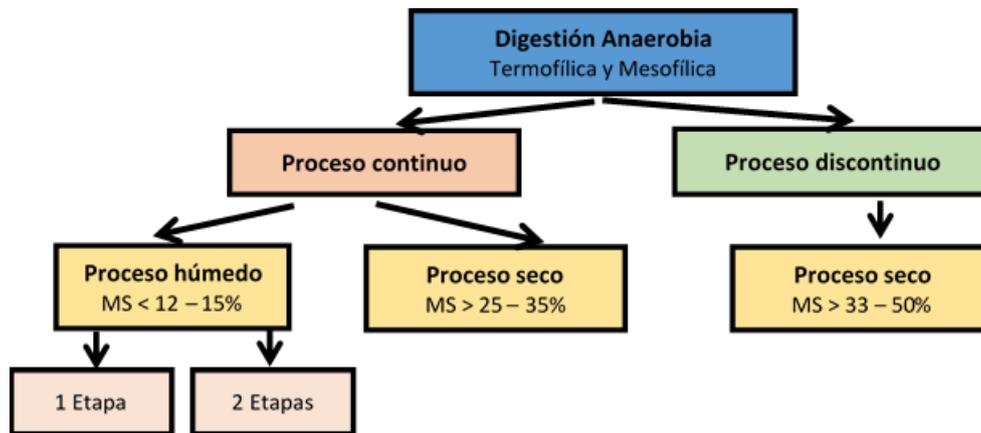


Fuente: <http://www.btainternational.de/der-btaprozess/bta-prozess.html>

4.3 Tecnologías anaerobias apropiadas.

El tipo de tecnología más apropiada depende de la composición del residuo y su contenido de agua. La figura 7 muestra una reseña de las posibles tecnologías para la digestión anaerobia y el contenido típico de materia seca del residuo o de otros sustratos.

Figura 7: Distintos tipos de digestión anaerobia de acuerdo con el contenido de sólidos totales en el proceso



Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

Para la fermentación de residuos orgánicos pueden ser apropiadas las siguientes tecnologías anaerobias:

- ! Fermentación seca (alto contenido de sólidos).
- ! Flujo pistón (semicontinuos).
- ! Fermentadores tipo Garage (batch, discontinuos).
- ! Fermentación húmeda (bajo contenido de sólidos).
- ! Reactor Continúo Agitado (CSTR por su sigla en inglés) con entrada directa de material orgánico después de un pre-tratamiento extensivo.
- ! Reactor Continúo Agitado con fermentación del percolado, tal como el proceso BTA (figura 5) con extracción del material orgánico por medio de un fluido y la circulación y fermentación del fluido.

El residuo orgánico doméstico separado en el origen se puede fermentar en un reactor de flujo pistón con un apropiado pre-tratamiento (reducción de tamaño y tamizado). Después de la fermentación, el digestato (salida orgánica) se puede deshidratar y, si ya se pasteurizó, utilizarlo directamente para propósitos en la agricultura.

Figura 8: Reactor de Flujo Pistón



Fuente: <https://www.axpo.com/axpo/ch/en/business-customers/biomass/about-axpo-kompogas.html>

Otra posibilidad para los residuos orgánicos separados en el origen con poco o sin pre-tratamiento es el fermentador tipo *Garage (batch)* (figura 8). Estos fermentadores operan en régimen discontinuo y se pueden cargar y vaciar con un cargador frontal. El material de entrada no tiene que estar pre-tratado, pero si contiene una cantidad significativa de impurezas, tales como plástico o metal, entonces se recomienda el pos-tratamiento. Normalmente, el material de salida se composte a lo cual calienta el material. Esto no solo pasteuriza el material, sino también lo seca hasta cierto punto. Cuando el material se seca, algunos métodos de separación son más fáciles, tales como un tamiz de tambor rotatorio o la separación magnética.

La fermentación húmeda no es muy típica para los residuos orgánicos domésticos, pero en algunos casos, ésta se puede considerar, recomendándose el uso del proceso BTA. Como se mencionó anteriormente el pre-tratamiento mecánico elimina muchas de las fracciones que pueden ser empleadas para reciclaje o pueden ser usadas potencialmente como combustible sustituto para ciertos procesos a alta temperatura. Los nutrientes de la fracción orgánica residual son extraídos con líquido en suspensión. La suspensión se alimenta a un tanque de fermentación húmeda. El material de salida se deshidrata y, si se composte o pasteuriza, puede ser adecuado para fines en la agricultura.

La fermentación húmeda también se podría considerar para ciertos residuos del procesamiento de alimentos, por ejemplo, grasas o aceites. Lo más adecuado para la fermentación húmeda es que el residuo contenga la menor cantidad de impurezas y que sea lo más bombeable posible.

Por el contrario, se requiere un alto nivel de pre-tratamiento y tecnología de separación. La típica tecnología de fermentación húmeda es la del Reactor Continuo Agitado (CSTR por sus siglas en inglés) como se puede observar en la figura 10.

Figura 9: Fermentador tipo Garage (Batch) para fermentación con alto contenido de sólidos



Fuente: <https://www.eggemann-recyclingtechnology.com/en/references/fermentation-plant-galmiz/>

Figura 10: Fermentación húmeda en un reactor de tanque completamente agitado o mezclado (CSTR por sus siglas en inglés)



Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

Diferentes ejemplos de la implementación de las tecnologías del biogás a gran escala para el tratamiento de residuos orgánicos y una lista de proveedores de tecnología están descritos en la publicación “Biorresiduos para biogás” (*Biowaste to biogas*) (<https://biowaste-to-biogas.com/Download/biowaste-to-biogas.pdf>).

4.4 Requerimiento de calidad del producto final.

El residuo orgánico tiende a ser rico en nutrientes y para ser considerado un producto, y no sujeto a eliminación, es importante que el producto final tenga una cierta calidad. Típicamente es importante que el producto esté libre de patógenos y tenga tan pocas impurezas como sea posible, tales como plásticos.

Con el objetivo de alcanzar esto se debería implementar algunos de los métodos que fueron mencionados anteriormente como la pasteurización. Si aún hay impurezas, o su cantidad es grande, tales como plásticos o metales, entonces se recomienda un pos-tratamiento, como fue mencionado anteriormente, en el caso de los fermentadores tipo *Garage*.

Tabla 3: Valores límites para sustancias nocivas opera la salud en el Decreto Alemán sobre Fertilizantes

Sustancia nociva para la salud	Valor límite sugerido [mg/kg materia seca uotra unidad en lista]
Arsénico (As)	40
Plomo (Pb)	150
Cadmio (Cd) (comenzando en 5% P ₂ O ₅ MF)	1,5 (o 50 mg kg ⁻¹ P ₂ O ₅)
Cromo (CrVI)	2
Nickel (Ni)	80
Mercurio (Hg)	1
Talio (Tl)	1
Tensoactivos perflorados (PFT)	0,1
Dioxinas Totales y dl-PCB	30 ng

Fuente: Normativa Alemana de Biogás

También se deben desarrollar pruebas periódicas para asegurar que el fertilizante orgánico no contiene altos niveles de sustancias nocivas, tales como metales pesados. En Alemania, hay un Decreto sobre fertilizantes, el cual provee los valores límites para sustancias nocivas para la salud. Se puede encontrar un extracto en la tabla 1.

El Decreto contiene un gran número de información y comentarios respecto a las fuentes especiales de residuos orgánicos (https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/anlage_2.html).

El Decreto Alemán de Residuos Orgánicos también brinda los límites para la cantidad de impurezas, tales como residuos plásticos y la cantidad de fertilizantes a partir de residuos orgánicos que podrían ser usados sobre las tierras de cultivo: máximo 30 t de materia seca por hectárea en 3 años si no se excede el valor límite para metales pesados (de otra forma sería un máximo de 20 t de materia seca por hectárea en 3 años).

4.5 Estudio de caso 1: El proyecto de biogás de la BSR – Biometano a partir de Residuos Orgánicos; Berlín; Alemania.

Materia prima	FORSU selectiva <70mm
Tecnología	2 digestores de Flujo Pistón x 2 400 m ³ cada uno, Termofílicos; 6 000 000 m ³ de biogás por año (cap. 400 m ³ CH ₄ h ⁻¹)
Uso del biogás y subproductos	El Biogás se refina por el lavado por amina a biometano y se alimenta a la red; entonces éste se usa en motores de combustión interna de cerca de 150 vehículos colectores de residuos; los líquidos son entregados a los agricultores como fertilizante; los sólidos son compostados y usados como fertilizante
Recuperación de la inversión simple	Costos de inversión: 30 000 000 Euro; No hay costo asociado a tarifas o subsidio; Ahorro por sustitución de diésel; venta de biometano y créditos de carbón; tasas por disposición
Energía ahorrada	Sustitución de cerca de 2,5 millones de litro de diésel por año
Otros atributos	Las cantidades totales de dióxido de carbono evitado son de aprox. 9 000 CO ₂ -equivalentes por año

Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

La planta de biogás está en operación regular desde el mes de octubre de 2013. La planta genera biogás a partir de biorresiduos recogidos selectivamente (FORSU) con una capacidad de diseño de 60.000 t /año.

El biogás se refina a biometano y se usa como combustible en motores de una flota de alrededor de 150 vehículos para la recogida de los residuos. El cambio del compostaje a la utilización del biorresiduo por medio de la digestión anaerobia y la producción de biometano fue realizado con el objetivo de optimizar el reúso del biorresiduo con especial énfasis para la protección del clima y la conservación de los recursos.

Las cantidades totales de carbón dejadas de emitir son de aproximadamente 9.000 CO₂-equivalentes por año. Cuando se compara al compostaje del biorresiduo que se practica actualmente esto significa un incremento de 9 veces del valor del balance de la emisión de GEI. El metano sustituye cerca de 2,5 millones de litros de diésel.

Figura 11: Planta de biogás de la compañía BSR, almacenamiento de gas e instalación para el refinamiento del Biogás; Camión para la recolección del residuo



Fuente: BSR

4.6 Estudio de caso 2: Manchester Bredbury Parkway (Reino Unido).

Materia prima	Residuos Sólidos Urbanos (RSU); 110 000 t/año entran a la planta; 86 000 t/año van al pre-tratamiento hidromecánico
Tecnología	Proceso BTA y fermentación húmeda
Uso del biogás y subproductos	Electricidad y calor. El excedente de calor se usa para secar el digestato.

Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

La planta de biogás de Manchester Bredbury Parkway se diseñó para tratar hasta 110 000 t de Residuos Sólidos Urbanos al año. El diseño incorpora un pre-tratamiento mecánico seco para obtener una fracción orgánica con pequeño tamaño de partícula (< 60 a 80 mm), una fracción de combustible derivado de residuos y una fracción de metales reciclables. La fracción orgánica se trata mediante una etapa de pre-tratamiento húmedo seguida de una digestión anaerobia húmeda mesofílica de una etapa basada en el proceso BTA. El biogás producido se transforma en energía eléctrica y térmica en unidades cogeneradoras. El excedente de calor se emplea en secar el digestato.

Figura 12: Planta de pre-tratamiento y digestores de biogás



Fuente: <http://www.bta-international.de/en/referenzen/ausgewaehlte-referen0/manchester-bredbury-parkway.html>

5 Potencial de biogás en Potosí y Sucre.

5.1 Municipio de Potosí.

El Municipio de Potosí tiene 16 distritos, de los cuales 12 son urbanos y 4 son rurales. La mayor cantidad de población está concentrada en el área urbana del Municipio. Los datos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y del Censo de Población y Viviendas (CPV) de 2012, establecen que 49.624 hogares se registraron en Potosí. El Departamento de Potosí tiene la mayor tasa de migración neta en Bolivia, 39,5%. Existe un alto porcentaje de migración de la parte rural a la ciudad, así como hacia otras ciudades en el país (INE, 2012). Con relación a la educación, el Municipio de Potosí tiene unidades de educación primaria y secundaria, la tasa de abandono escolar en el área urbana es de 3%, mientras que en las áreas rurales este alcanza el 10%. Las principales razones para la migración son: la distancia desde los centros educacionales y las malas condiciones del tiempo. El Municipio sintetiza la mayor población del Departamento, concentra una diversidad de actividades económicas, industriales, comerciales, financieras, minera-metalúrgicas, turismo y servicios. La mayoría de su población se dedica al comercio y al transporte, seguido por la minería y la agricultura. El turismo es otro sector potencial del Municipio de Potosí. "Declarado en 1987 como un Patrimonio Cultural y Natural de la humanidad", Potosí es parte de los circuitos turísticos internacionales, proveyendo la riqueza de su Cerro Rico, el patrimonio de sus monumentos religiosos, coloniales, históricos, museos, su herencia cultural, folklore, costumbres, fiestas y una variedad de sitios naturales, aguas termales, suelos ecológicos y microclimas" (Quiroga, 2015).

Los datos del INE (CPV, 2012), indican que la población en el Municipio de Potosí fue de 191.302 habitantes, con una tasa intercensal de crecimiento anual de 2,5%. Para el año 2019, la población se proyecta alcanzar los 216.981 habitantes (INE, 2018).

La modalidad de manejo y administración de los servicios de higiene urbana es descentralizada, siendo responsabilidad única de la Empresa Municipal de Aseo Potosí (EMAP). Los servicios que ofrece EMAP son:

- Barrido y limpieza de áreas públicas,
- Recogida y transporte de residuos sólidos,
- Disposición final de residuos sólidos en basurero controlado.

En el Municipio de Potosí no hay un sistema aplicado de recolección de diferentes residuos. Algunas compañías tienen contratos de servicio con EMAP para una recogida especial y/o recepción solamente, en el vertedero controlado de Karachipampa. Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) mezclados son dispuestos por el método de vertedero en Karachipampa.

Figura 13: Vertedero de Karachipampa con conductos para la combustión del gas



Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

Debido al manejo y las características de confinamiento que se llevan a cabo durante el día, existen conductos para el escape de gases, pero no hay sistema de captura o colector de estos gases. En la actualidad la combustión de este gas se realiza bajo la supervisión y control del personal técnico de la EMAP. La empresa de aseo ha estado trabajando en la generación de drenajes y canales para la colección del lixiviado en la parte superior e inferior del vertedero de Karachipampa. Éste tiene dos piscinas colectoras de lixiviado que solamente paran por un cierto período de tiempo para decantar los sólidos en suspensión. De acuerdo con EMAP, se planifica un nuevo vertedero en Paranturí que incluye una etapa de pre-tratamiento semi-mecánico y compostaje de los compuestos orgánicos.

Figura 14: Lixiviado en el vertedero de Karachipampa y las piscinas de sedimentación



Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

De acuerdo con EMAP la generación total de residuos en 2018 fue de 45.810 toneladas con un contenido orgánico de 54%. Hay una variación durante los meses de febrero, agosto y diciembre, debido al carnaval, y a las festividades de Chutillos y fin de año.

No hay información específica sobre las cantidades de residuos generados en el sector industrial. La tabla 3 brinda las cantidades de residuos orgánicos de los sectores investigados en este estudio.

Tabla 4: Producción de residuos orgánicos en Potosí

Municipio de Potosí	Toneladas por año
Total de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	45.810
Fracción Orgánica de los RSU (FORSU)	24.737
Cervecería	
Bagazo de la cervecería	137,5
Matadero	
Estiércol	720
Mezcla de sangre, grasa, vísceras	451
Contenido ruminal	1.320
Cementerio	
Flores y otros residuos orgánicos	137,5

Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

El mayor generador de residuos es el matadero con 2.491 t por año seguido por la cervecería y el cementerio con 137,5 t cada uno. Los tres sectores juntos producen 2.766 t/año que constituye el 11% del total de los residuos orgánicos generados en Potosí. Este resultado muestra el gran potencial de los residuos remanentes de los pequeños productores domésticos. Otros sectores con un alto potencial de generación de residuos orgánicos, tales como mercados, no están incluidos en este estudio debido a la falta de datos sobre los volúmenes de residuos.

Figura 15: Bagazo de cervecería, residuos de matadero (sangre y grasa), contenido del rumen, residuos de cementerio



Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

Basado en los volúmenes de los residuos orgánicos, se pueden calcular el potencial de producción de biogás y de energía para los diferentes sectores:

Tabla 5: Potenciales para la generación de energía vía biogás para diferentes residuos orgánicos en Potosí

	Toneladas por año	Sólidos totales	Sólidos volátiles	Rendimiento específico de metano	Contenido de metano	CH4	CH4	Electricidad	Potencia Instalada
		%	% ST	l* kg-1 SV	%	m3 t-1	m3 a-1	kWhel.	kWel.
Residuos sólidos urbanos	24.737	40	50	615	60	73,8	1.825.620	7.462.587	933
Bagazo de cervecería	137,5	17,6	73,7	530	59	40,6	5.577	22.798	3
Matadero									
Estiércol	720	8	80	370	55	13	9.377	38.332	5
Mezcla de sangre, grasa, vísceras	451					81	36.531	149.328	19
Contenido rumial	1.320	12,7	88,4	480	55	29,6	39.123	159.924	20
Cementerio									
Flores y otros residuos	137,5	23,4	73,3	360	55	34	4.670	19.088	2
Asumiendo la eficiencia energética de 41% y 43% para electricidad y producción de calor en una Unidad Cogeneradora (CHP) y contenido de energía de 9,97 kWh/m ³ de metano									

Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

Los resultados indican que el potencial total para producir energía a partir del biogás producido mediante el tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) es de 933 kW de potencia eléctrica instalada en una unidad cogeneradora de electricidad y calor (CHP).

El potencial podría ser usado para producir alrededor de 7.462.587 kWh de energía eléctrica y 7.826.616 kWh de energía térmica por año. La mayor contribución al potencial total lo tienen los residuos del matadero, los cuales no se separan en este momento, con 43 kW de potencia eléctrica instalada o cerca de 347.583 kWh de energía eléctrica y 364.538 kWh de energía térmica.

5.2 Municipio de Sucre.

La ciudad de Sucre territorialmente está dividida en 8 distritos, de los cuales 5 son área urbana y 3 son rurales. La mayor cantidad de la población se concentra en el área urbana del Municipio. La información desde el INE y desde el CPV del 2012, establece que Sucre ocupa el 5to lugar en población entre todas las ciudades capitales de Bolivia. Sus ingresos provienen por los servicios, principalmente la administración del Estado (poder judicial) y turismo, seguido por algunas industrias tales como el cemento, cerveza, chocolate y artesanía. Sucre es la capital del Estado Plurinacional de Bolivia y el turismo es un factor protagonista y potencial en el Municipio. La ciudad de Sucre preserva monumentos de arquitectura colonial, por los cuales fue declarada un Sitio Patrimonio Mundial por la UNESCO. Los datos del INE (CPV, 2012), indican que la población en el Municipio de Sucre fue de 284.536 habitantes. Para el año 2019, se proyecta que la población alcance los 291.819 habitantes (INE, 2018).

La Entidad Municipal de Aseo Urbano Sucre (EMAS), es una compañía descentralizada a cargo del manejo administrativo y operativo de los servicios de aseo urbano en el Municipio de Sucre. Los servicios que EMAS ofrece son:

- Barrido y limpieza de áreas públicas.
- Recogida y transporte de residuos sólidos.
- Disposición final de residuos sólidos en vertedero controlado de Lechuguillas.

En 2015, se arrancó una planta piloto de compostaje, ubicada en el antiguo vertedero de La Esperanza. Esta comenzó con la recogida de residuos orgánicos desde puntos estratégicos (mercados, cementerio general, matadero, entre otros), gradualmente se incrementaron nuevos sitios de recogida, con un trabajo simultáneo de concienciación y educación de la población en general. A inicios de 2019, la recogida selectiva empezó en el vecindario de Santa Clara de la ciudad de Sucre (proyecto piloto), con la participación de aproximadamente 318 familias, con un promedio de 5 miembros

por familia. También se incorporaron más de 50 centros comerciales, restaurantes, cafeterías, ventas de helados, hoteles, y otros negocios. Para estos sitios, la recogida selectiva de residuos sólidos se lleva a cabo de acuerdo a un calendario establecido, con diferentes frecuencias, días y horas, dependiendo del tipo de residuo. La cantidad de residuos orgánicos recogidos selectivamente para el compostaje es de cerca de 2.117 t/año hasta el momento, pero hay planes de incrementar el volumen desde 5,8 hasta 20 t/día.

Actualmente, la disposición final de residuos sólidos urbanos se realiza en el vertedero controlado de Lechuguillas. Según EMAS, este vertedero controlado cumple con las regulaciones nacionales, y con las directrices de la operación y cierre del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). El vertedero tiene instalado conductos para la captura de gases, los que son quemados para evitar la contaminación atmosférica. De acuerdo a la información de EMAS el vertedero está en el proceso de transformación para convertirse en un relleno sanitario, cumplimentando todas las características técnico-ambientales.

Tabla 6: Producción de residuos orgánicos en Sucre

Municipio de Sucre	Toneladas por año
Total de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	75.263
Fracción Orgánica de los RSU (FORSU)	45.534
Planta de tratamiento: lodos	6.693
Bagazo de la Cervecería	780
Residuos orgánicos selectivos (Fábrica Nacional de Cemento S.A., 2 mercados, cementerio general)	2.117

Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

La mayor contribución al potencial de biogás es de la planta de tratamiento de aguas negras con 6.693 tonelada de lodo por año, seguido por los residuos orgánicos recogido selectivamente a partir de diferentes productores (cementerio, mercados, FANCESA, etc.) con cerca de 2.117 t/año. El resto de los productores son relativamente pequeños en cantidad.

Figura 16: Vertedero Lechuguillas y residuos recogidos selectivamente usados para compostaje



Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

Basado en los volúmenes de residuos orgánicos se puede calcular el potencial de biogás y de energía para diferentes sectores de Sucre:

Tabla 7: Potenciales para la generación de energía vía biogás para diferentes residuos orgánicos en Sucre

	Toneladas por año	Sólidos totales	Sólidos volátiles	Rendimiento específico de metano	Contenido de metano	CH4	CH4	Electricidad	Potencia Instalada
		%	% ST	l kg-1 SV	%	m3 t-1	m3 a-1	kWhel.	kWel.
Residuos sólidos urbanos	45.534	40	50	615	60	73,8	3.360.418	13.736.379	1.717
Lodo de depuradora	6.693	5,6	52,6	525	60	9,3	61.985	253.377	32
Bagazo de cervecería	780	23,8	12,6	530	59	9,4	7.314	29.898	4
Residuos orgánicos recogidos selectivamente	2.117	14	82,8	615	60	42,8	90.554	370.156	46,27
Matadero									
Contenido rumial	312	12,7	88,4	480	55	29,6	9.247	37.800	5

Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

El total de los residuos orgánicos en Sucre, incluyendo los sólidos urbanos, los industriales y comerciales, tienen un gran potencial para la producción de energía, pero la cantidad de residuos aportado por los productores individuales son pequeños para implementar una tecnología de biogás.

Los resultados del estudio indican que el potencial total de energía desde el biogás producido a partir de la FORSU es de 3.360.418 m³ de metano por año o 1.717 kW de potencia eléctrica instalada en una unidad cogeneradora de energía eléctrica y térmica (CHP). El potencial podría utilizarse para producir alrededor de 13.736.379 kWh de energía eléctrica y 14.406.447 kWh de calor por año.

Los residuos orgánicos recogidos selectivamente tienen un potencial de cerca de 46 kWel, los lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales de cerca de 32 kWel, y los residuos de la cervecería solamente 4 kWel, lo cual es muy pequeño para una planta individual y no es suficiente para la generación de biogás a escala industrial (comienza con unidades cogeneradoras de 75 kW).

Los potenciales presentados en los cuadros 5 y 7 se calcularon a partir de la información recopilada sobre las cantidades de residuos facilitada por EMAP, EMAS y otras empresas. Para Potosí los residuos de la cervecería, el contenido del rumen y los desechos del cementerio fueron calculados con base en el TS, VS de pruebas de laboratorio. La información sobre el contenido orgánico de los residuos municipales fue proporcionada por la EMAP. En el caso de Sucre, los valores de laboratorio se utilizaron para el cálculo del contenido orgánico de los lodos depurados, los residuos de cervecería, el contenido de rumen y los productos orgánicos separados. La información sobre el contenido orgánico de los residuos municipales fue facilitada por EMAS.

Todos los demás valores eran valores teóricos de la literatura. La producción potencial de electricidad se estimó con un 41% y un 43% de eficiencia eléctrica y térmica de la cogeneración y un contenido energético de 9,97 kWh/m³ de metano.

6 Factibilidad técnica para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos en las ciudades de Sucre y Potosí.

Sobre la base del estudio realizado en las ciudades de Sucre y Potosí, sobre la generación de los residuos orgánicos, el biogás resultante y los potenciales de energía, es posible obtener energía a partir de 3 escenarios diferentes:

- Tratamiento de residuos orgánicos recogidos selectivamente.
- Tratamiento de residuos sólidos urbanos mezclados.
- Tratamiento de residuos orgánicos de fuentes seleccionadas desde los productores individuales, por ejemplo, los residuos del matadero de Potosí.

6.1 Tratamiento de residuos orgánicos recogidos selectivamente.

Con relación a los efectos sobre el medioambiente y el clima, la implementación de la separación en el origen es lo más favorable comparado con otras soluciones. La recogida selectiva de residuos en el origen no solo permite el reciclaje de fracciones de valor y asegura una alta calidad de estos recursos sino también facilita el uso de la fracción orgánica para posteriores usos energéticos y materiales, y reduce las emisiones de GEI y la contaminación por lixiviados. El procesamiento y clasificación de los residuos orgánicos separados es mucho más fácil y barato comparado con los residuos sólidos urbanos mezclados.

Las cantidades de residuos orgánicos en Sucre y Potosí están en un rango que permite proveer a una instalación de tratamiento de tamaño típico, las que se diseñan para cantidades de más de 20.000 toneladas por año.

Un punto de inicio podrían ser los sitios donde los residuos orgánicos ya están siendo separados para el compostaje, por ejemplo, el nuevo vertedero Paranturí para los residuos orgánicos de Potosí.

Los residuos orgánicos separados se podrían transportar a una sala de recepción donde se descargan, trituran y clasifican. La fracción orgánica < 60 mm se podría usar en dos reactores paralelos para la generación de biogás. La tecnología empleada podrían ser reactores de flujo pistón con agitadores de paleta los que se adaptan para el tratamiento de orgánicos con un alto contenido de sólidos.

El digestato remanente se podría tratar con una prensa de tornillo para separar los sólidos de los líquidos. Los sólidos se podrían utilizar para un compostaje a corto plazo de cerca de 2 semanas seguidas por una segunda etapa de compostaje para estabilizar el fertilizante orgánico y finalizar el proceso. El líquido se podría usar como un fertilizante orgánico, como

reciclado en la planta de tratamiento de residuos o tiene que ser tratado residuos de la clasificación con partículas > 60 mm podrían ser usados como material de estructura en el compostaje después de la eliminación de las impurezas o se deben disponer en el vertedero o incinerar.

En la tabla 8 se brindan los principales parámetros del proceso y las dimensiones de la planta de biogás tipo flujo pistón para el tratamiento de la FORSU en Potosí y Sucre.

Tabla 8: Parámetros de proceso y dimensiones de planta de biogás con digestores de flujo pistón para el tratamiento de la FORSU en Potosí y Sucre

Parámetro	Unidades	Municipio de Potosí	Municipio de Sucre
Entrada, Residuos Orgánicos	[t d ⁻¹]	68	125
Tiempo de Retención Hidráulica	[d]	29	29
Carga Orgánica Volumétrica	[kg SV m ⁻³ d ⁻¹]	6,8	6,9
Volumen del reactor	[m ³]	2 x 1000	2 x 1800
Producción de metano	[m ³ d ⁻¹]	5.018	9.225
Almacenamiento del gas	[m ³]	8.000	15.000
Potencia de la Unidad Cogeneradora	[kWel]	2 x 500 kWel	1 x 1 000 kWel 1 x 750 kWel
Electricidad producida	[kWh a ⁻¹]	8.000.000	14.000.000
Digestato (sólido)	[t a ⁻¹]	13.900	25.500
Reducción de CO2	[t CO2 equivalentes]	90% de reducción comparada con un vertedero no controlado de cerca de 5 000 toneladas por año	9.125
Estimación del costo de la inversión	[Bs]	Pre-tratamiento: 3.000.000 Planta de biogas: 28.000.000	Pre-tratamiento: 5.500.000 Planta de biogas: 49.000.000
	[Bs]	31.000.000	54.5000.000

Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

En el caso del nuevo vertedero en Paranturí para los residuos orgánicos de Potosí, se podría integrar una planta de biogás a la clasificación ya planeada para combinar producción de biogás y compostaje. La energía producida se podría usar para abastecer de combustible el equipamiento necesario para la clasificación de los residuos mezclados, por ejemplo, el triturador, el tamiz de tambor, las cintas transportadoras, entre otros. De esta forma, el tiempo y el espacio necesarios para el compostaje se reducirían significativamente. En este caso, no se recomienda el uso del compost como fertilizante debido a la contaminación de este a partir de los residuos mezclados.

Asumiendo que los precios de la electricidad para las industrias son de cerca de 1 Bs kWh, la producción de biogás a partir de residuos orgánicos podría ahorrar hasta 8.000.000 Bs para Potosí al año y hasta 14.000.000 Bs en Sucre, sin considerar los ingresos adicionales por la tarifa de entrada y el calor, y no se incluye el financiamiento del proyecto de biogás.

6.2 Tratamiento de residuos sólidos urbanos mezclados.

Si la recogida selectiva no es factible y se tiene que implementar un tratamiento para los residuos sólidos urbanos mezclados entonces se tienen disponibles dos opciones diferentes. Las más comunes son el MBT y el proceso BTA. Debido a la contaminación del digestato el contenido orgánico estabilizado remanente del proceso MBT no se puede ser usar como fertilizante orgánico en la mayoría de los casos y debe disponerse en el vertedero. El proceso BTA podría ser una opción técnicamente factible, pero es más sofisticada tecnológicamente y más costosa que el tratamiento de los residuos orgánicos separados en el origen. Por lo tanto, estos procesos no se consideran como una opción sostenible y viable económicamente para el tratamiento de residuos orgánicos en Bolivia.

6.3 Tratamiento de residuos orgánicos de fuentes seleccionadas desde los productores individuales, por ejemplo, los residuos del matadero de Potosí.

En el Municipio de Potosí el matadero en Teja Tambo es la única industria en este estudio capaz de generar suficientes residuos orgánicos para poder proyectar una planta pequeña de biogás. Cerca de 6,8 t de residuos de matadero se producen como promedio cada día. Actualmente, la excreta vacuna se usa como fertilizante en la agricultura. Tanto la sangre, como el contenido ruminal, las grasas y los intestinos se disponen en el vertedero. Todos estos residuos podrían ser usados para la producción de biogás, y la energía eléctrica y térmica generada podría ser directamente empleada en el matadero para cubrir parte de la demanda de energía de este. De acuerdo

con Ortner (2015), la demanda de calor y de energía eléctrica se podrían reducir en alrededor de un 50% y un 60%, a través de la implementación de la tecnología del biogás en la industria de procesamiento de la carne, resultando en ahorros de costo energético del 63%. Además de los beneficios económicos, que es el criterio de decisión más relevante, también se puede alcanzar una reducción del 79% en las emisiones de GEI.

En la tabla 9 se muestran los datos básicos sobre los parámetros operacionales y el dimensionado de la planta. En la figura 15 se puede observar un diagrama esquemático de la planta de biogás.

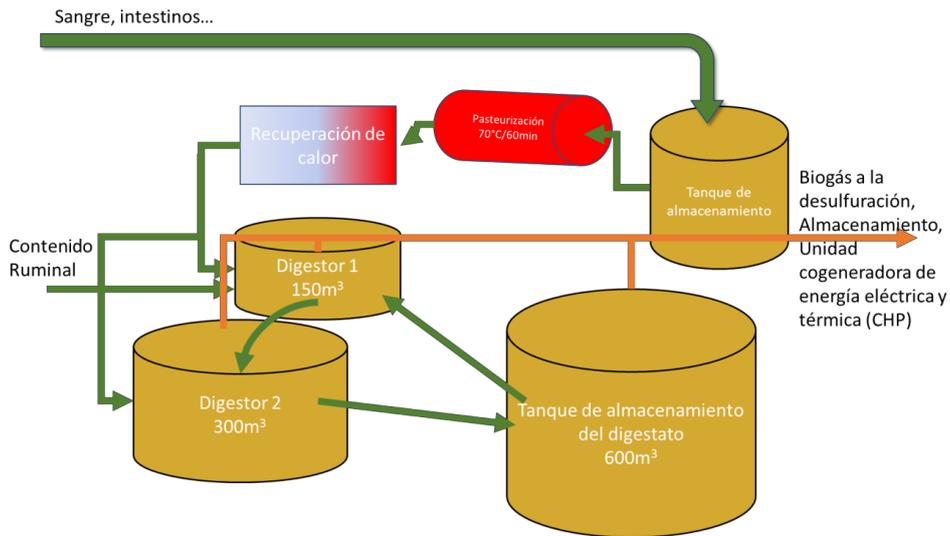
Tabla 9: Parámetros de proceso y dimensionado de la planta de biogás con Reactor Continuo Agitado para el tratamiento de los residuos orgánicos mediante la fermentación húmeda del matadero en Teja Tambo

Parámetro	Unidades	Valor
Parámetro	[t d ⁻¹]	Estiércol: 2 Mezcla de sangre, grasa, vísceras: 1,2 Contenido ruminal: 3,6 Total: 0,67 toneladas de SV por día
Entrada, Residuo Orgánico	[d]	65
Tiempo de Retención Hidráulica	[kg SV m ⁻³ d ⁻¹]	1,5
Carga Orgánica Volumétrica	[m ³]	450
Volumen del Reactor	[m ³ d ⁻¹]	233
Producción de Metano	[m ³]	1.000
Almacenamiento del Gas	[kWeI]	45
Potencia de la Unidad Cogeneradora	[kWh a ⁻¹]	360.000
Electricidad producida	[t a ⁻¹]	1.000
Digestato (Sólido)	[Bs]	3.240.000

Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

La configuración de la planta de biogás podría ser la siguiente:

Figura 17: Diagrama esquemático del diseño de la planta de biogás



Fuente: Elaborado por Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie

Para reducir los riesgos para la salud, y permitir la utilización subsecuente del digestato como fertilizante orgánico, se requiere de una etapa de pasteurización para el tratamiento de la sangre, el contenido ruminal y otros residuos peligrosos. La pasteurización se debe realizar durante 60 min a 70°C. Posteriormente, el sustrato se alimenta en el primer digestor.

El proceso emplea dos tanques para la fermentación (Reactores Continuos Agitados, CSTRs por sus siglas en inglés) que se cargan de un modo combinado serie/paralelo, seguido por un tanque final para el almacenamiento del digestato. Los tres fermentadores son operados a 38°C. Las condiciones promedio aplicadas son:

- Digestor 1: TRH de 35-40 días; sustratos: contenido ruminal + material mezclado higienizado + material reciclado del almacenamiento del digestato.
- Digestor 2: TRH de 20-25 días; sustratos: material mezclado higienizado + material del fermentador 1.
- Almacenamiento del digestato.

El principal riesgo de la digestión anaerobia de los residuos de matadero es una inhibición por NH_4 que podría influir negativamente sobre el proceso como resultado del alto contenido de proteína en el sustrato de entrada. Un límite para la inhibición por amonio está dado con 31,2 g NH_4/kg de ST en el digestor o más de 3 500 mg NH_4/L . No obstante, es posible tener valores superiores debido a la adaptación de los microorganismos a este sustrato. La adición de elementos traza ha demostrado tener un efecto positivo sobre la estabilidad del proceso y la producción de metano.

7 Conclusiones.

Este estudio identifica el potencial de biogás a partir de residuos orgánicos en las ciudades de Sucre y Potosí, y se evalúa la factibilidad técnica para la producción de energía a partir de dichos residuos en estas ciudades. Sobre la base de los resultados de una investigación de mesa, entrevistas con grupos de interés locales y los análisis de muestras de residuos orgánicos se estimó el potencial de energía del biogás para las ciudades de Sucre y Potosí. Para guiar las entrevistas se preparó un cuestionario que facilitó la recolección de toda la información necesaria. Los resultados muestran una falta de información relativa a diferentes temas, por ejemplo, las cantidades de residuos orgánicos de sitios específicos y la composición de los residuos orgánicos, costos de inversión para tecnologías de tratamiento, y de los ingresos de la venta de energía y fertilizantes orgánicos.

El estudio muestra que existe un potencial para la generación de energía a partir de los residuos orgánicos en las ciudades de Sucre y Potosí.

- En Potosí el nuevo vertedero en Paranturí tendrá una separación semi-mecánica de compuestos orgánicos para compostaje, y la tecnología del biogás podría ser implementada para reducir la demanda de energía en el lugar, reducir el tiempo y el espacio necesitado para el compostaje, y crear valores añadidos a partir de las ventas de energía eléctrica y térmica.
- En Sucre, ya existen los proyectos para la separación en el origen a partir de los productores individuales para suministrar una pequeña instalación de compostaje. La experiencia actual podría ser empleada para introducir una separación general de los compuestos orgánicos y otros materiales de valor, y preparar una implementación de la tecnología del biogás a mediano plazo.
- El matadero de Teja Tambo (Potosí) tiene residuos suficientes para proveer a una pequeña planta de biogás. Este sitio podría ser usado como una planta piloto para mejorar el conocimiento sobre el biogás y mostrar la factibilidad de la tecnología en Bolivia.

La principal barrera hasta el momento es la falta de separación en el origen para proveer cantidades suficientes de residuos orgánicos separados y aplicar tecnología estándar tales como digestores de flujo pistón para el tratamiento de residuos orgánicos.

Solo las ventas de energía pueden no ser suficientes para balancear el costo de inversión y operación, debido a los bajos precios actuales de la energía. Las tasas por la transportación de residuos, las tasas por el manejo y tratamiento de los residuos, así como los ingresos por las ventas del fertilizante orgánico juntos, podrían hacer la producción de biogás una solución viable.

El precio de la energía eléctrica, es el factor que más afecta la factibilidad del biogás. Mientras mayor es el precio de la electricidad mayor es la factibilidad económica del biogás. Desde un punto de vista económico, la tecnología del biogás usando los residuos separados en el origen es la opción más atractiva. Esto también implica una reducción significativa de la cantidad de residuos que van a parar al relleno sanitario. Sin embargo, la separación de los residuos en las casas requerirá alguna planificación, campañas de información y adaptación del sistema de recogida. Esta etapa viene con el reto de una logística más compleja e inversiones. En cualquier caso, es importante decidir sobre cómo será utilizado el biogás, por ejemplo, para producir energía térmica, energía eléctrica o combustible para transporte, pues esto afectará toda la economía del esquema. El uso del digestato necesita ser considerado debido a que esto afecta las opciones sobre la fuente de los residuos y la tecnología que se emplee. El digestato proveniente de residuos orgánicos clasificados es un fertilizante orgánico con alta calidad que posiblemente puede alcanzar buenos precios y sustituir fertilizantes basados en los fósiles o fertilizantes químicos. Aun así, la creación de un mercado para el fertilizante orgánico requerirá la colaboración con los agricultores y/o las organizaciones de agricultores. Para este propósito, la participación de la Universidad será muy útil para el análisis de la calidad del digestato, monitorear los resultados y dar credibilidad entre los diferentes grupos de interés.

El uso de residuos orgánicos para generar biogás contribuye a mejorar el medioambiente local y el bienestar de la población, así como mitigar las emisiones de GEI. La conversión del residuo a energía (*Waste-to-energy*) sirve para crear lazos positivos en la economía urbana, mientras que provee una forma eficiente de mejorar el manejo de los residuos sólidos urbanos. Además, los esfuerzos para implementar la producción de biogás en las áreas urbanas pueden ayudar a construir las experiencias y el conocimiento sobre el biogás en Bolivia, lo cual puede ser incorporado e integrado a lo largo de todo el país. Un beneficio adicional de este esfuerzo podría ser el desarrollo de políticas innovadoras en el manejo de residuos, incluyendo el desarrollo de instrumentos para promover y financiar el manejo de residuos a nivel municipal.

Sucre y Potosí son lugares adecuados para servir como punto de partida para un esquema de biogás y el establecimiento de plantas de producción de biogás. Este estudio indica que existen barreras institucionales que necesitan ser dirigidas inmediatamente a hacer la introducción de nuevas tecnologías para hacer posible el manejo de residuos en áreas urbanas de Bolivia.

La factibilidad económica depende de un número de factores algunos de los cuales están definidos a nivel nacional tales como los precios de la energía. Otros factores se pueden ajustar a nivel local e incluye una revisión de los

esquemas de costo-recuperación, incorporación de programas de bienestar social vinculados al sector de manejo de residuos, las asociaciones público-privado, y el mercadeo de los productos de la planta de biogás. En particular, es esencial que las municipalidades revisen la sostenibilidad económica de los servicios que se están brindando para la recogida y la disposición de los residuos, y también deben introducir nuevas prácticas que puedan garantizar mejoramiento en el tiempo. La introducción del recojo selectivo del residuo orgánico ciertamente requerirá ser realizado por la población. Al mismo tiempo, esto ofrece una oportunidad para informar sobre el manejo de los residuos, introducir incentivos para mejorar la relación costo-recuperación, invitar a la participación y resaltar el liderazgo de la municipalidad.

La implementación de un sistema de recogida selectiva para los componentes orgánicos y otros recursos reciclables no solo permitirá el tratamiento anaerobio de la fracción orgánica para producir energía y fertilizantes, sino que también tendrá efectos positivos adicionales:

- Reducción de los volúmenes de residuos a ser tratados en rellenos sanitarios y por tanto esta solución tradicional podría ser empleada por más tiempo alargando su vida útil, disminuyendo la cantidad de nuevos emplazamientos.
- Mejoría de las condiciones de trabajo para los trabajadores en los rellenos sanitarios (disminución de la contaminación microbiológica, y de malos olores, etc.).
- Reducción intensiva de emisiones de gases de efecto invernadero desde los rellenos sanitarios debido a una significativa menor cantidad de compuestos orgánicos en los residuos vertidos.
- Disminución de la contaminación ambiental debido a los lixiviados.

Por lo tanto, es altamente recomendable implementar los siguientes pasos:

- Mejorar la información sobre el manejo de residuos, el reciclado, la separación en el origen, el uso del compost/digestato y los beneficios medioambientales a todos los niveles (desde las escuelas hasta los ministerios).
- Desarrollo de los sistemas de recogida para la separación en el origen.
- Construcción de plantas de biogás a escala piloto para el tratamiento de residuos orgánicos para aumentar el conocimiento sobre el tema y preparar la implementación a escala industrial.
- Ajuste del marco legal para apoyar la utilización de fertilizantes orgánicos y la reducción de gases de efecto invernadero (GEI).

8 Literatura recomendada.

Guía sobre el Biogás - Desde la producción hasta el uso
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ca](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&)

[ved=2ahUKEwilqPiEzbbhAhWFIVAKHTAeC0gQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwilqPiEzbbhAhWFIVAKHTAeC0gQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fmediath)

[2F%2Fmediath](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwilqPiEzbbhAhWFIVAKHTAeC0gQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fmediath)

[ek.fnr.de%2Fmedia%2Fdownloadable%2Ffiles%2Fsamples%2F%2Fe%2Fleitfad](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwilqPiEzbbhAhWFIVAKHTAeC0gQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fmediath)

[enbiogas-es-2013.pdf&usg=AOvVaw1cR4AWRxX7xZWAHeZOafwq](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwilqPiEzbbhAhWFIVAKHTAeC0gQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fmediath)

Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management
https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf

Biowaste to biogas <https://biowaste-to-biogas.com/Download/biowaste-to-biogas.pdf>

The Possibilities for Biogas in Bolivia: Symbioses Between Generators of Organic Residues,

Biogas Producers and Biogas Users <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:431737/FULLTEXT01.pdf>

Source separation of MSW http://task37.ieabioenergy.com/files/datenredaktion/download/Technical%20Brochures/source_separation_web.pdf

Título: Evaluación del potencial de generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en las zonas urbanas y semiurbanas de las ciudades de Sucre y Potosí

Autor: Institut für Biogas , Kreislaufwirtschaft & Energie

Ejecutado por: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Programa: Programa de Energías Renovables (PEERR)

Programa N°: 15.2035.2-001.0

Gestión: 2019

1. La elaboración de este documento es apoyado por la Cooperación Alemana a través de la GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GmbH) y su Programa de Energías Renovables.

2. Se autoriza la reproducción total o parcial del presente documento, sin fines comerciales y citando adecuadamente la fuente, previa autorización escrita del Ministerio de Energías.

Ministerio de Energías

Calle Potosí esquina calle Ayacucho S/N, zona Central
Teléfono: 2188800
www.minenergias.gob.bo

Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas

Edificio Ex BBA, Av. Camacho N° 1413 Esq. calle Loayza
Teléfono: 2188800

Cooperación Alemana al Desarrollo con Bolivia

Oficina de la Cooperación Alemana al Desarrollo
Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Av. Julio C. Patiño N° 1178, entre calles 17 y 18, Calacoto
Casilla 11400
La Paz, Bolivia

Oficina del Programa de Energías Renovables (PEERR)
Av. Sánchez Bustamante N° 504 entre calles 11 y 12 de Calacoto
La Paz, Bolivia
T +591 (2) 2119499
F +591 (2) 2119499, int. 102
E johannes.kissel@giz.de
I www.giz.de

Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ)

BMZ Bonn
Dahlmannstraße 4
53113 Bonn, Germany
T +49 (0) 228 99 535-0
F +49 (0) 228 99 535-3500
poststella@bmz.bund.de
www.bmz.de

BMZ Berlín
Stresemannstraße 94
10963 Berlín, Germany
T +49 (0) 30 18 535 - 0
F +49 (0) 30 18 535-2501



Implementada por:

