

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMETANO
A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS ORGÁNICOS PARA SER
UTILIZADO EN EL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE PÚBLICO DE
BOGOTÁ (SITP), MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN
SECUNDARIA Y EL USO DE HERRAMIENTAS DE EVALUACION
MULTICRITERIO.**

HÉCTOR HERNANDO HERRERA FLÓREZ

UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

GESTIÓN SOSTENIBLE DE LA ENERGÍA

BOGOTÁ D.C. 2021

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMETANO A PARTIR DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS ORGÁNICOS PARA SER UTILIZADO EN EL SISTEMA
INTEGRADO DE TRANSPORTE PÚBLICO DE BOGOTÁ (SITP), MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE
INFORMACIÓN SECUNDARIA Y EL USO DE HERRAMIENTAS DE EVALUACION MULTICRITERIO.**

HÉCTOR HERNANDO HERRERA FLÓREZ

Trabajo de grado para obtener el título de:

Magíster en Ingeniería – Gestión Sostenible de la Energía

Directora: Yineth Pineros Castro, IQ, MsC, PhD

Profesora Titular 1 Área de procesos y productos sostenibles

UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

GESTIÓN SOSTENIBLE DE LA ENERGÍA

BOGOTÁ D.C.

FECHA

06 de agosto de 2021

Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	5
1.1 JUSTIFICACIÓN	6
1.2 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.2.1. Políticas y gubernamentales (marco regulatorio).....	6
1.2.3. Experiencias internacionales y nacionales en generación y uso de biogás y biometano..	8
1.2.3.1. Biogás y transporte público.....	9
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	10
2.1 ASPECTOS TÉCNICOS	10
2.1.1. Digestión anaeróbica (DA).....	10
2.1.2. Digestión anaeróbica en fase húmeda.	10
2.1.3 Parámetros que determinan la productividad de biogás en un reactor DA..	12
2.1.3.1 Composición química del sustrato.	12
2.1.3.2. PH y Potencial Redox:	12
2.1.3.3. Temperatura: la guía sobre el biogás.....	13
2.1.3.4. Humedad:	13
2.1.3.5. Relación C/N:.....	13
2.1.2.6. TRH y velocidad de carga orgánica en el biodigestor:	14
2.2 Digestión anaeróbica en fase seca:.....	14
CAPÍTULO 3: OBJETIVOS	14
3.1. OBJETIVO GENERAL	15
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
3.3. METOLOGÍA	16
3.3 DESCRIPCION POR OBJETIVOS.....	18
CAPÍTULO 4. DIAGNÓSTICO DE LA GENERACIÓN Y DISPOSICIÓN DE FORSU EN BOGOTÁ.	19
4.1. DATOS GENERALES	19
4.2. PROGRAMAS DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS.....	21
CAPÍTULO 5: TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMETANO, CONSIDERACIONES TÉCNICAS, AMBIENTALES Y ECONÓMICAS:	23
5.1 TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA FORSU EN FASE HÚMEDA... 23	
5.1.1. Reactor de mezcla completa sin recirculación (RMC).....	23

5.1.2. Reactor de mezcla completa con recirculación	24
5.1.3. Reactor con retención de biomasa, sin recirculación.	25
5.1.4. Otros sistemas.	26
5.2 TIPO DE TECNOLOGÍAS APLICABLES A FORSU, VENTAJAS Y DESVENTAJAS, CAPACIDADES	26
CAPITULO 6. DESCRIPCIÓN DEL SITP.....	28
CAPÍTULO 7. IDENTIFICACIÓN Y EVALUACION MULTICRITERIOS.	30
7.1 EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE LAS TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA.....	30
7.2 TECNOLOGIAS ESCOGIDAS PARA EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA.	31
7.3 DEFINICIÓN Y PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS Y SUS VARIABLES.....	31
7.4 ASIGNACIÓN DE PESOS ESPECÍFICOS	33
7.5 MATRIZ DE EVALUACIÓN	35
7.6 CONCLUSIONES DE LA PRUEBA MULTICRITERIO	36
CAPITULO 8. ANÁLISIS DE EXTERNALIDADES Y LA FACTIBILIDAD DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y BIOMETANO.....	38
8.1 ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO.....	38
8.2 BENEFICIOS ESTIMADOS.....	39
CAPITULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	42
CAPITULO 10 BIBLIOGRAFÍA.....	43
ANEXO 1 Escenario Promethee.....	48
ANEXO 2 Flujo de fondos del proyecto.	49

Índice de tablas.

Tabla 1 Composición macroscópica de residuos Bogotá 2017.....	20
Tabla 2 Participación FORSU por localidad	21
Tabla 3 Proyecciones RSOU y Biogás Bogotá.....	21
Tabla 4 Iniciativas de aprovechamiento de FORSU. A 2017.....	23
Tabla 5 Flota y rendimiento a Gas Natural.....	29
Tabla 6 Consumo energético por tecnología.....	30
Tabla 7 Grupo de Criterios Técnicos: Descripción de criterios y subcriterios.....	33
Tabla 8 Escala de complejidad del subcriterio ‘digestor’	34
Tabla 9 Escala de complejidad del subcriterio ‘pretratamiento’	34
Tabla 10 Escala de complejidad del subcriterio ‘digestato’	34
Tabla 11 Descripción de criterios económicos.....	34
Tabla 12 Ponderación de los Grupos de Criterios.....	35
Tabla 13 Ponderación de los subcriterios del Grupo de Criterios Técnicos.....	35
Tabla 24 Ponderación de los subcriterios económicos.....	35
Tabla 35 Parámetros principales de las tecnologías escogidas.....	36
Tabla 16 Costo total de una planta de DA, sistema húmedo.....	39
Tabla 17 tarifas Impuesto al Carbono propuesta.....	40
Tabla 18 Indicadores de rentabilidad del proyecto.....	41

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Fases de la digestión anaeróbica DA.....	11
Ilustración 2 Esquema de reactores de mezcla para la producción de biogás	24
Ilustración 3 Reactores con retención de biomasa	25
Ilustración 4 Esquema simplificado y balance de la operación del digestor húmedo	27
Ilustración 5 Flota Troncal y alimentación a marzo 6 de 2021.	28
Ilustración 6 Diagrama jerárquico para la evaluación multicriterio.....	31
Ilustración 7 Ordenamiento prueba multicriterio.....	36
Ilustración 8 Esquema de planta de sistema de DA vía húmeda 50 Ton/día.....	37
Ilustración 9 Flujo de caja	40

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Colombia se ha comprometido a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero GEI en un 20% al 2030 (MADS, 2018), y ha resaltado en las comunicaciones nacionales de cambio climático presentadas, que en el sector de energía, por uso final de energéticos, es el transporte el que más emisiones GEI genera, (IDEAM PNUD MADS DNP CANCELLERIA, 2015) y recientemente el presidente Ivan Duque Marquez manifestó la meta de reducción del 51% de las emisiones de gases efecto invernadero del país para el año 2030 (MADS, 2020) concomitante con esta obligación, la ciudad de Bogotá se ha visto abocada a proponer medidas de cambio de flota de transporte para cumplir con la renovación del Transmilenio, se proyectan más de setecientos vehículos de su flota operando a gas natural (TRANSMILENIO, 2019).

A partir de la entrada de este importante número de vehículos operados a gas natural para el sistema integrado se hace necesario evaluar la posibilidad descrita en diferentes estudios y experiencias internacionales de generación de biogás (Ayuntamiento de Madrid, 2018) y compatibilizar la obligación establecida por el documento CONPES 3874 (DNP, 2016) del aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) para la producción de biogás para mitigar la generación de GEI, aprovechar el mercado de bonos de carbono incipiente, los incentivos a fuentes no convencionales de energías renovables (FNCR) mediante la Ley 1715 de 2014, (SENADO, 2014) y la necesidad que tiene Bogotá de hacer una disposición adecuada de sus residuos para la producción de energía, disminuyendo la contaminación, el tratamiento de lixiviados, la propagación de vectores y generando adicionalmente un mejorador del suelo.

Bogotá genera aproximadamente 6265 toneladas de residuos sólidos urbanos por día (SSPD, 2018) los cuales se disponen en el relleno de Doña Juana en forma de celdas de disposición técnicamente manejadas pero cuya gestión ha sido puesta en duda. En este proceso históricamente se han generado alrededor de 10000 Nm³/h de biogás (Biogas Doña Juana, 2017) los cuales se han aprovechado para la generación eléctrica desde abril de 2016, con una planta de 1,7 MW de potencia. (Biogas Doña Juana, 2017)

Adicionalmente, el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 “Pacto por Colombia, pacto por la equidad” (DNP, 2019) establece, en su documento base en el “Pacto por los recursos minero energéticos para el crecimiento sostenible y la expansión de oportunidades”, entre sus objetivos “Promover las nuevas tendencias energéticas, y como uno de sus propósitos para estimular el aprovechamiento de bioenergía la necesidad de actualizar el atlas de biomasa residual y

desarrollar herramientas e instrumentos que permitan viabilizar proyectos de generación de energía a partir de biomasa, adicionalmente las autoridades ambientales regionales revisarán la reglamentación ambiental y la estrategia de participación de ciudades en el uso de los rellenos sanitarios y de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en la producción de biogás, de manera que se logre el aprovechamiento energético de residuos y aguas residuales municipales, procesos vinculados a maximizar y potencializar los impactos positivos derivados de la política de economía circular”.

1.1 JUSTIFICACIÓN

La evaluación técnica y económica que propone este trabajo, surge de valorar la posibilidad de contar con fuentes no convencionales de energía para usarlas como combustible en el Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) de Bogotá, la oportunidad de contar con un sistema centralizado de recolección y disposición de Residuos especialmente la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), el requerimiento de la disposición adecuada de los mismos mediante el aprovechamiento de éstos, como proveedores de una fuente de energía no convencional actualmente subvalorada y la posibilidad que ofrece el aprovechamiento del contenido energético de los residuos sólidos urbanos en su fracción orgánica para la producción de biogás. Esto sumado al compromiso de reducir emisiones GEI en el primer sector emisor de GEI como es el transporte, ha llevado a explorar la potencialidad de producir biogás y enriquecerlo a biometano para su uso como combustible complementario al gas natural, aspecto que aborda este trabajo.

En diversos estudios de entidades gubernamentales y privadas del Distrito Capital D.C., se evidencia que la disposición de los residuos sólidos orgánicos no es la más adecuado, ya que no se hace un aprovechamiento óptimo de su potencial energético con la producción de biogás vía digestión anaeróbica (DA), el cual genera externalidades positivas como el aprovechamiento de su contenido energético y reducción de gases efecto invernadero GEI, la posibilidad de producir un agente mejorador del suelo en el proceso y de mejoras en aspectos sanitarios y paisajísticos, por numerar algunas.

Se pretende a partir de la estimación del potencial de producción de biogás de la FORSU provenientes de biomasa residual urbana no disputable, en especial los provenientes de los residuos urbanos domésticos, hacer un análisis de conveniencia técnico económico mediante herramientas de decisión multicriterio para la producción y el aprovechamiento del biogás en el sistema de transporte público de Bogotá.

1.2 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Políticas y gubernamentales (marco regulatorio).

En la última década la preocupación constante por aprovechar las FNCR dada su alta potencialidad en el país, así como el incremento en las emisiones de gases de Efecto Invernadero GEI ha llevado a generar legislación para promover el uso de fuentes energéticas no contaminantes y la necesaria transformación energética que esto conlleva. En seguida se hace un somero recuento de las leyes y decretos relacionados con esta propuesta.

- Ley 1715 de 2014 (SENADO , 2014) : Su expedición “tiene por promover el desarrollo y la utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional... y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético”, en el capítulo III estableció los criterios e incentivos a la inversión en proyectos de fuentes no convencionales de energía para promover la entrada de los mismos.

- La resolución CREG 240 de 2016 (CREG, 2016), adopta normas aplicables al servicio público de gas combustible con biogás y biometano.

- El documento CONPES 3874 de 2016 (DNP, 2016) de Política Nacional para la gestión integral de residuos sólidos establece la oportunidad de aprovechar los residuos sólidos urbanos para valorización energética,

- La UPME genera y divulga la reglamentación para acceder a los diversos incentivos de Ley y la reglamentación para su aplicabilidad (UPME, 2021). Este organismo ha desarrollado estudios para la determinación de la potencialidad de generación de biogás de biomasa residual y el diseño de una herramienta para establecer la viabilidad técnica, ambiental, financiera y económica de proyectos con diversos tipos de residuos que permita la generación de energía a partir de residuos sólidos urbanos y la generación de Biogás.

- La licitación de la fase V del sistema Transmilenio (Transmilenio, 2020) involucra la entrada de más de setecientos buses (741) alimentados con gas natural los cuales reemplazarán parcialmente la flota de la fase I y II del sistema masivo de transporte, esta es una oportunidad de promover la generación de biogás de usos en transporte coadyuvando a la mitigación GEI, la disminución de problemas ambientales y sanitarios en la zona de Doña Juana.

- El Decreto 926 de 2017 (MHCP , 2017) establece la posibilidad de venta de bonos de carbono la cual tiene como propósito estimular la formulación e implementación de iniciativas de mitigación de GEI a cambio de la no causación del impuesto lo cual podría ser un beneficio de la implementación del proyecto.

- La estrategia nacional de economía circular (ENEC), (Presidencia de la Republica, 2020) ha establecido temáticas de utilización de biomasa y promueve el desarrollo de proyectos y la utilización de Fuentes No Convencionales Renovables y la posibilidad de desarrollar proyectos de bioenergía, entre ellos el biogás.

- El CONPES 3874 de 2016 (DNP , 2016) da orientaciones para una política nacional para la gestión integral de residuos sólidos y establece que “El Ministerio de Minas y Energía, por su

parte, coordinará las medidas necesarias para la valorización energética de los residuos no aprovechables, tanto a nivel de las entidades del sector energía (Comisión de Regulación de Energía y Gas, UPME) como con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio y la CRA, para efectos de garantizar las actividades requeridas para obtener la materia prima procedente del servicio público de aseo.

- La recientemente expedida Ley de Transición Energética la cual tiene por objeto entre otros: “La transición energética, entendida como un cambio estructural a largo plazo en los sistemas energéticos, se debe a dos hechos, inequívocos: El agotamiento de los combustibles fósiles y, sobre todo, la degradación socio-ambiental a la que su uso contribuye decisivamente ha hecho comprender la necesidad de una profunda revolución energética.” (Senado , 2021)

El aprovechamiento del potencial energético de la FORSU ha tenido un desarrollo notable desde ya hace un tiempo, y la siguiente sección muestra las diferentes experiencias notables a nivel local e internacional.

1.2.3. Experiencias internacionales y nacionales en generación y uso de biogás y biometano.

El informe de Mercado mundial de biometano: “El gas verde se globaliza” (CEDIGAZ, 2019) referencia el apoyo al biometano como combustible complementario al Gas Natural y reporta la instalación de más de 1.000 plantas de producción de biometano operando en treinta y cuatro países, con una con un exponencial crecimiento en la producción mundial de biometano, alcanzando los tres mil millones de metros cúbicos en (3 bcm). En Europa, el uso de biometano se está extendiendo por todo el continente y su producción ascendió a casi 2 bcm. Estados Unidos es ahora líder en el uso de biometano como combustible para vehículos, lo cual ha logrado incrementando su producción y fomentado la expedición de regulación federal y estatal para biocombustibles. Recientemente China e India han adoptado tecnologías de mejora del biogás y se han fijado ambiciosos objetivos de producción de biometano y figuran como grandes mercados emergentes. En América Central y del Sur, Brasil está tomando medidas reglamentarias para aprovechar su enorme potencial.

La agencia internacional de energía IEA en el documento de “Perspectivas del biogás y el biometano...” (IEA, 2020) enuncia que el potencial de biogás y biometano del mundo podrían cubrir el 20% de la demanda mundial de gas y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En 2017 la UPME adelantó un proyecto de “Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento” (UN_TECOSOL, 2018) cuyo objetivo general fue identificar algunos tipos de biomasa residual disponibles para la generación de biogás y, estimar el potencial de producción de biogás de fuentes promisorias; así mismo realizar análisis económico de establecimiento de proyectos para producción de biogás y su eventual enriquecimiento a Biometano. Este proyecto muestra como resultado la factibilidad de generar biogás con la biomasa residual no disputable que puede complementar el gas natural en un 20% según el BECO (UPME, 2021) de la UPME.

Como se ve existe un acervo normativo, regulatorio y de incentivos para la promoción y desarrollo del potencial de producción de biogás en el país y su aprovechamiento energético y de mitigación de GEI.

Las iniciativas locales, como la recién lanzada Mesa Nacional de Aprovechamiento de Masa Residual (MADS , 2021) que demuestran la alta producción de residuos de biomasa, llevan a considerar de facto la viabilidad en el desarrollo de proyectos como el que estudia esta propuesta.

La Unión Europea ha explorado la potencialidad y desarrollo de proyectos para el aprovechamiento del biogás en sistemas de transporte; se reporta que en Suecia el 90% del transporte interprovincial es a Biometano (Circulo de Investigacion de Biogas y Biometano, 2020).

El portal residuosprofesional.com (RESIDUOS PROFESIONAL, 2015) relaciona en España la participación del centro tecnológico IAT con la empresa municipal de limpieza de Málaga LIMASA, en un proyecto Europeo del programa Horizonte 2020 denominado “Valorización de los residuos de alimentos para la producción de biometano y su uso en estaciones de servicio locales cuyo objetivo es la promoción de la recogida separada de residuos orgánicos de diversas fuentes para producir biometano y usarlo en el transporte a través de redes locales de estaciones de servicio.

1.2.3.1. Biogás y transporte público

El biogás, una energía renovable que utiliza como fuente de alimentación el reciclaje de la basura que generamos, en concreto, los desechos orgánicos o la depuración de aguas residuales.

Cuando los residuos biológicos –como restos de frutas– se encuentran en los vertederos, comienzan a degradarse naturalmente y a descomponerse, y esto genera un gas –el llamado biogás–. Con un tratamiento adecuado, los desechos pueden utilizarse como un combustible muy parecido al gas natural. De esta forma, se aprovechan las enormes cantidades de los restos que la sociedad genera, al tiempo que se reduce la utilización de combustibles muy contaminantes, como es el caso del diésel o la gasolina.

Fuente. Editorial S.L Henneo

Según la posible configuración de la cadena de prestación del servicio de gas combustible, con biogás a partir de la comercialización desde la producción de Biogás según las competencias regulatorias de la CREG, toman en cuenta que es posible generar beneficios para la sociedad.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 ASPECTOS TÉCNICOS

El apartado siguiente resume algunos aspectos técnicos importantes a considerar en los procesos de producción de biogás desarrollados internacionalmente.

2.1.1. Digestión anaeróbica (DA)

El manual de biogás de la FAO (FAO , 2011).hace una descripción muy completa de las materias primas y los procesos, así como las etapas de digestión anaeróbica para la producción de biogás la cual se resume a continuación:

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y de descomposición de la materia orgánica contenidas en un substrato; biomasa residual animal y vegetal, la cual es convertida en biogás, cuyo resultado es una mezcla de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) con trazas de otros elementos, este proceso es desarrollado por un grupo de bacterias anaeróbicas que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno (O_2).

Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de biomasa, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria de alimentos, y de bebidas alcohólicas y de la industria papelera y de algunas industrias químicas orgánicas, en subproductos útiles. Un aspecto a resaltar que hace este proceso más atractivo es que, está documentado que en el proceso de DA, más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano.

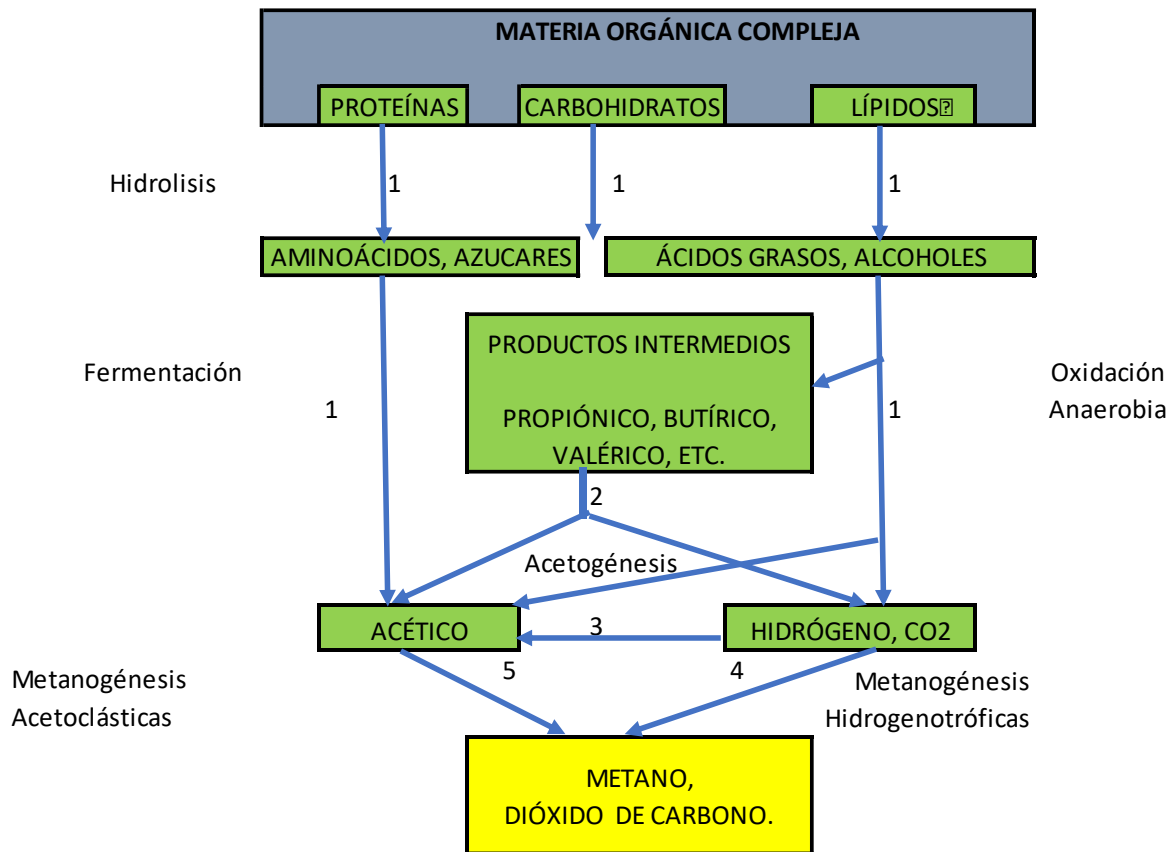
Las técnicas probadas en la producción de biogás aplicables a la FORSU son principalmente la digestión anaeróbica en fase húmeda y en fase seca.

La escogencia de fase húmeda para esta propuesta está relacionada con la información reportada por la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos Domiciliarios (UAESPD) la cual se referencia en su momento.

2.1.2. Digestión anaeróbica en fase húmeda.

La digestión anaerobia está caracterizada por el desarrollo de esta en fases consecutivas diferenciadas en el proceso de degradación del sustrato, interviniendo cinco (5) grandes poblaciones de microorganismos, de acuerdo con lo presentado en la Ilustración 1.

Ilustración 1 Fases de la digestión anaeróbica DA



Fuente: (FAO , 2011)

Los números dentro de la ilustración indican la población bacteriana predominante y por tanto responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Estas poblaciones se caracterizan por estar compuestas por organismos de diferentes velocidades de crecimiento y diferente sensibilidad a compuestos intermedios como inhibidor (H_2 , ácido acético o amoníaco etc.). Lo cual implica que cada etapa presentará diferentes velocidades de reacción según la composición de la materia orgánica alimentada y por el desarrollo del proceso global lo cual implica una simbiosis y equilibrio que no promueva la acumulación de compuestos inhibidores o la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), que por su mayor presencia puede llevar a un descenso del pH.

Las etapas de desarrollo de la digestión anaeróbica se llevan a cabo favorecidas por la asociación sintrófica (colaborativa) entre bacterias acetogénicas y metanogénicas. El artículo “Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás” (Palau Estevan, Carmen Virginia , 2021) presenta los fundamentos de la digestión anaeróbica la cual se resume a continuación.

El proceso de degradación de la materia orgánica contempla diferentes etapas en las que intervienen, como se mencionó previamente, diversas poblaciones de bacterias y que también se presentan en la Ilustración 1. - La primera fase es la hidrolítica, donde los compuestos complejos presentes en la biomasa se transforman en moléculas solubles y degradables como azúcares, aminoácidos, alcoholes y ácidos de cadena larga. - La siguiente etapa acidogénesis, las bacterias acidogénicas actúan sobre los compuestos provenientes de la hidrólisis rompiéndolos en ácidos de cadenas más cortas como; ácido acético, butírico, propiónico y valérico, siguiendo este esquema, a continuación, en la Acetogénesis, estos productos intermedios son convertidos por las bacterias acetogénicas en ácido acético (CH_3COOH), Hidrogeno (H_2) y Dióxido de Carbono (CO_2) - En la última etapa del proceso la Metanogénesis, las bacterias metanogénicas forman metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) a partir de los compuestos formados en la etapas anteriores.

Este proceso requiere condiciones específicas para desarrollarse eficientemente, las cuales se describen a continuación:

2.1.3 Parámetros que determinan la productividad de biogás en un reactor de digestión anaerobia.

El artículo “Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad” (Rivas Solano & et al, 2011) describe los parámetros químicos y físicos relacionados con la productividad de biogás en un reactor de fase húmeda. Enseguida, se resumen los principales parámetros y en la sección siguiente se hace énfasis en los estándares claves para una eficiente producción de biogás.

2.1.3.1 Composición química del sustrato.

Los sustratos ideales para la digestión anaerobia húmeda son los desechos orgánicos con alto contenido de humedad, su origen puede ser agrícola, industrial y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), así como las excretas de origen animal.

Los residuos de la industria alimentaria y de las actividades agrícolas son excelentes como sustratos para la digestión anaerobia (DA), puesto que su procesamiento conlleva a que no contengan contaminantes, patógenos, ni metales pesados.

Es necesario tener en cuenta la presencia de nutrientes como nitrógeno y azufre además del carbono, pues estas relaciones conllevan a una producción de biogás más o menos eficiente, lo mismo ocurre con la presencia de algunos elementos traza, necesarios para el desarrollo de las comunidades microbianas (arqueas metanogénicas) que son las encargadas de la producción de biogás.

2.1.3.2. PH y Potencial Redox: El pH es un factor crítico a controlar ya que el complejo de reacciones bacterianas encargadas de la generación de biogás es muy dependiente del potencial de Hidrógeno en especial el grupo de bacterias metanogénicas encargados de la producción de

metano. El pH puede sufrir variaciones como consecuencia de las propiedades características de la mezcla se alimentan al biodigestor y debido a los procesos reactivos que ocurren allí. Resulta fundamental realizar un control periódico del pH, se ha encontrado en la práctica y reportado que el pH óptimo se encuentra en el rango de 7,0 a 7,8.

El potencial de óxido-reducción (REDOX) (CEUPE, 2021) mide la facilidad con la cual un medio reductor pierde o si es oxidante gana electrones. Las bacterias metanogénicas, en general constituyen el grupo biológico que determina el mayor o menor éxito del proceso puesto que su baja velocidad de crecimiento y los estrictos requerimientos de bajo potencial redox y de pH, así como su alta sensibilidad a la inhibición por presencia de oxígeno molecular, determinan su eficacia.

2.1.3.3. Temperatura: la guía sobre el biogás (GIZ, 2010) presenta recomendaciones desde su producción hasta su uso y establece que el principio general es que la tasa de reactividad química crece con un incremento de la temperatura ambiente. Pero para determinados procesos metabólicos de descomposición biológica se presentan óptimos de crecimiento a diferentes temperaturas y si la temperatura está por encima o por debajo de su rango óptimo, los microorganismos pueden inhibirse o dañarse.

Los rangos óptimos de temperaturas para los grupos de bacterias que participan en el proceso se pueden dividir en tres grupos: - Microorganismos psicrófilos con condiciones óptimas de temperaturas por debajo de los 25 °C, con estas temperaturas se logra un bajo desempeño de producción de gas. - Las bacterias mesófilas con crecimiento óptimo en el rango de temperaturas entre 37 y 42 °C formadoras de metano y en la práctica son las más usadas debido a su rendimiento de biogás relativamente alto y se obtiene una buena estabilidad del proceso en este rango de temperatura. -Las bacterias cuyo proceso es termófilico con rango óptimo de temperaturas se sitúa entre 50 y 60 °C., son usadas por conveniencia para procesos donde es indispensable eliminar gérmenes dañinos por medio de la higienización térmica del sustrato o si se usa como sustrato o desechos con alta temperatura cómo los resultantes de algunas industrias alimenticias.

2.1.3.4. Humedad: La descomposición biológica de la biomasa mejora con humedad entre 50 y 70%. (Gonzalez , Rustrián, Houbroun, & Zamora, 2008) y para una buena metanogénesis se requiere concentraciones superiores al 60% de humedad en la biomasa a tratar.

2.1.3.5. Relación C/N: La relación carbono-nitrógeno debe estar en una proporción de (C/N) entre 20 y 30 partes, si la proporción de nitrógeno es mayor la producción de biogás puede caer debido a la formación de amonio libre (NH₄⁺), el cual inhibe la fermentación anaeróbica y es un tóxico para las bacterias metanogénicas. (Rivas Solano & et al, 2011).

Lo ideal para asegurar sustratos que generen un rendimiento alto en metano es la codigestión de obtener un balance adecuado de nutrientes que favorezcan un adecuado crecimiento de los grupos materias orgánicas ricas en nitrógeno (N) con desechos con contenido alto en carbono y así de

bacterias que descomponen la materia orgánica dentro del reactor de biodigestión (ver sección anterior) e incrementar la productividad del proceso. (Rivas Solano & et alt, 2011).

2.1.2.6. Tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica en el biodigestor: (FAO , 2011): El volumen y la masa a cargar diariamente del sustrato orgánico al digestor, tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga diaria disminuye el tiempo de retención, este junto con la velocidad de carga de la materia orgánica por tipo de sustrato, establecen los principales parámetros de diseño necesario para definir el volumen del digestor. La materia orgánica medida en términos de sólidos volátiles (SV) es la parte de la materia seca (MS) o sólidos totales (ST), que en este proceso a alta temperatura se vaporizan sometidas a temperaturas superiores a 550°C. Esta establecido en la práctica por requerimientos operacionales para un reactor anaerobio que el contenido de MS no debe exceder el 10 % de la mezcla agua - sustrato en la mayoría de los casos.

La eficiencia de producción de biogás en el equipo o proceso se determina expresando el volumen de biogás producido por unidad de masa de MS o SV. La generación de biogás requiere un rango de concentración de MS es muy amplio, usualmente desde 1% al 30%. La concentración óptima depende de la temperatura de operación del reactor.

2.2 Digestión anaeróbica en fase seca:

Los procesos de digestión anaerobia seca están contemplados como aquellos en el que la materia orgánica está presente en el sustrato con un porcentaje de sólidos seco entre 15% al 40%, la cual se degrada en ambientes anaerobios en digestores sellados. Regularmente, este proceso es en un solo paso en un digestor y es por lotes. (Grisales Rangel & Arellano Ramírez, 2017).

Teniendo en cuenta las definiciones establecidas, y en función de la concentración de sólidos) en el interior del reactor, se puede distinguir:

- Digestión anaerobia húmeda: Con un contenido en sólidos de entre el 4 y el 10%.
- Digestión anaerobia semihúmeda o semiseca: Con un contenido en sólidos de entre el 10 y el 20%.
- Digestión anaerobia seca: Con un contenido en sólidos de entre el 20 y el 35%.

Las características de humedad contenidas en la FORSU de Bogotá (CONSORCIO NCU-UAESP, 2018) llevan a que la tecnología a utilizar sea la de Digestión anaerobia húmeda ya que el reporte referenciado muestra un contenido en sólidos cercano al 10%.

Una oportunidad interesante para la promoción de la valoración energética de residuos, en este caso de la FORSU está dada por la disponibilidad de los mismos y su relativa facilidad en tenerlos agrupados al final del tubo, en la fase de disposición en el relleno sanitario.

CAPÍTULO 3: OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnica y económicamente el potencial de producción de biometano, a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y su aplicabilidad como combustible (biometano) en el sistema integrado de transporte público de la ciudad de Bogotá.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Realizar diagnóstico acerca de la generación y disposición de Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos en Bogotá.
- Identificar y caracterizar tecnologías para la producción de biogás y purificación a biometano, considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos
- Analizar información del sistema Transmilenio acerca de consumo específico de gas natural en vehículos del sistema de transporte público y su potencialidad de complementariedad.
- Identificar y seleccionar la tecnología más adecuada de acuerdo con un conjunto de criterios con base a una metodología de identificación y selección de alternativas
- Analizar los Costos y Beneficios financieros y económicos atribuibles al proyecto y desarrollar un Análisis Costo Beneficio de este para evaluar la factibilidad del proceso de producción de biogás y biometano.
- Proponer y establecer conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

3.3. METODOLOGÍA

Se presenta la metodología para el cumplimiento de cada una de las etapas del proyecto.

1. Realizar el diagnóstico acerca de la generación y disposición de FORSU en Bogotá.

1.1 Recolección de información de estamentos distritales encargados de la gestión de residuos sólidos urbanos.

1.2 Información de línea base de toneladas dispuestas de FORSU susceptibles de metanizar.

Fuente UAESPD

2. Identificar y caracterizar tecnologías para la producción de biogás y purificación a biometano, considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos.

2.1 Revisión bibliográfica y documental de tecnologías de producción de biogás y enriquecimiento a Biometano.

2.2 Realizar documento resumen de la información consultada.

Fuente, manual de biogás y literatura de biogás de diversos autores. FAO y Otros.

3. Analizar información del sistema Transmilenio acerca de consumo específico de gas natural en vehículos del sistema de transporte público y su potencialidad de complementariedad.

3.1 Realizar entrevistas virtuales con funcionarios de Transmilenio y solicitud de información de composición del sistema.

3.2 Descripción del equipo automotor del SITP con énfasis en los vehículos a Gas Natural y sus características técnicas.

Fuente, Entrevista e información primaria de Transmilenio.

4. Evaluar mediante una herramienta multicriterio para seleccionar la o las más adecuadas de acuerdo con un conjunto de criterios con base a una metodología de identificación y selección de alternativas.

4.1 Revisión bibliográfica acerca de herramientas de definición multicriterio y escogencia de esta para aplicación en este proyecto.

4.2 Una modelo desarrollada de la metodología multicriterio escogida.

Fuente, manuales de la metodología y bibliografía de aplicación de esta.

5. Identificar los Costos y Beneficios financieros y económicos atribuibles al proyecto y desarrollar un Análisis Costo Beneficio de este para evaluar la factibilidad del proceso de producción de biometano.

5.1 Definición de metodología de evaluación de proyectos más consecuente y definición de criterios y variables a emplear.

5.2 Análisis costo beneficio del proyecto, flujo de fondos e indicadores de factibilidad.

Fuente, metodología de evaluación de proyectos, interpretación de indicadores.

6. Establecer conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

6.1 Recopilación de resultados de la metodología aplicada y establecimiento de conclusiones.

6.2 Flujo de fondos del proyecto. Tabla de indicadores. Conclusiones.

Fuente, manuales de evaluación de proyectos.

3.3 DESCRIPCION POR OBJETIVOS

Esta sección describe sucintamente la metodología desarrollada para el cumplimiento de los objetivos específicos propuestos y su relación con el objetivo general.

1. Realizar el diagnóstico de la generación y disposición de FORSU en Bogotá. Con información secundaria compartida por la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos -UAESP- (UAESP, 2021) entidad encargada de la gestión de los residuos sólidos en Bogotá se recopiló la información de la generación de residuos por localidad y la caracterización de FORSU.
2. Identificar y caracterizar tecnologías para la producción de biogás y purificación a biometano, considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos: Conocida la tasa y cantidad de la producción de FORSU, se escoge la tecnología de digestión anaerobia más favorable a aplicar dependiendo de la caracterización de los residuos y la asociada al proceso de enriquecimiento.
3. Analizar información del sistema Transmilenio acerca de consumo de gas natural en vehículos del sistema de transporte público y su potencialidad de complementariedad. Con información reportada por Transmilenio S.A. (TRANSMILENIO, 2019) para la fase V, se estima el consumo específico de Gas Natural en los nuevos buses, el costo del combustible y las características específicas de los articulados.
4. Evaluar mediante una herramienta multicriterio para seleccionar la más adecuadas de acuerdo con un conjunto de criterios con base a una metodología de identificación y selección de alternativas. Seleccionar las variables a para la aplicación de la herramienta VISUAL PROMETHEE (Fernández Barberis & alt, 2013) y escoger de acuerdo con el catálogo de tecnologías y empresas de biogás (GIZ, 2015)
5. Identificar los Costos y Beneficios financieros y económicos atribuibles al proyecto y desarrollar un Análisis Costo Beneficio para evaluar la factibilidad del proceso de producción de biometano. Establecer los costos financieros del proceso de acuerdo con la tecnología escogida y valorar los beneficios financieros y económicos del proceso y el proyecto. Con base en estas consideraciones se hace un análisis de los indicadores técnicos, económicos y ambientales y de externalidades para evaluar la viabilidad del proceso de producción de biometano a escala industrial y comercial. Se desarrolló el flujo de fondos financiero y económico para estimar los indicadores del proyecto.
6. Establecer conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

CAPÍTULO 4. DIAGNÓSTICO DE LA GENERACIÓN Y DISPOSICIÓN DE FORSU EN BOGOTÁ.

4.1.DATOS GENERALES

De acuerdo con información reportada por la UAESP en el estudio de consultoría cuyo objeto fue “Realizar el estudio técnico de la caracterización en la fuente de residuos sólidos generados en la Ciudad de Bogotá Distrito Capital por tipo de generador y establecer el uso de métodos alternativos de transporte para materiales aprovechables “ (CONSORCIO NCU- UAESP, 2018) del total de residuos sólidos que ingresan al Relleno Sanitario Doña Juana 6868 Ton/día, los residuos orgánicos representan el 51,32% (3490,57 Ton/día).

En la Tabla 1 se presenta la composición de los residuos caracterizados en la fuente, los cuales pueden ingresar a la cadena productiva de reciclaje de la ciudad y al aprovechamiento de orgánicos.

Tabla 1 Composición macroscópica de residuos Bogotá 2017.

Material	Porcentaje de generación
Orgánicos	51,32%
Plásticos	16,88%
Celulosas	13,67%
Textiles	4,54%
Vidrios	3,67%
Otros	3,36%
Madera	1,60%
Finos	1,43%
Metales	1,13%
Complejos	0,96%
Inertes	0,84%
Peligrosos domiciliarios	0,61%

Fuente: (CONSORCIO NCU- UAESP, 2018)

El estudio referenciado utilizó para la caracterización la Metodología para el análisis de residuos sólidos (SWA-Tool) (European Commission Project: Solid Waste Analysis-Tool , 2004) la cuál brinda información para el análisis de la generación per cápita, peso, volumen, densidad, humedad y composición física de los residuos sólidos. En las características de los materiales, se observaron cambios respecto al potencial de aprovechamiento, debido a su composición.

El muestreo fue realizado entre los meses de septiembre- diciembre de 2017 en 19 localidades para 6 estratos socioeconómicos y usuarios comerciales.

Las localidades con una mayor participación en la generación de residuos orgánicos del total de residuos son mostrados en la Tabla 2:

Tabla 2 Participación FORSU por localidad

Localidad	Porcentaje de participación en FORSU
Mayor participación	
Usme	51,32%
Ciudad Bolívar	16,88%
Tunjuelito	13,67%
Puente Aranda	4,54%
Menor participación	
La Candelaria:	42,83%
Mártires	41,06%

Fuente: (CONSORCIO NCU- UAESP, 2018)

Los resultados encontrados para la producción per cápita de residuos para Bogotá en el año 2017 fue de 0,855 Kg/Hab-día, mientras que la producción per cápita de FORSU en la ciudad de Bogotá fue de 0,43 kg/Hab-día, el documento del plan de gestión integral de residuos sólidos de la unidad administrativa especial de servicios públicos (Bogota UAESP, 2021) presenta una proyección realizada en el PGIRS de la cantidad de residuos como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3 Proyecciones RSOU y Biogás Bogotá

AÑO	Total Residuos Kg/día	Población	Producción Per cápita kg-persona día	Producción kg /día de RSOU*	Producción de biogás**
2020	9,650,435	7,743,955	1.246	4,149,687	539,459
2021	9,802,647	7,834,167	1.251	4,215,138	547,968
2022	9,971,116	7,901,653	1.262	4,287,580	557,385
2023	10,128,404	7,968,095	1.271	4,355,214	566,178
2024	10,311,200	8,034,649	1.283	4,433,816	576,396
2025	10,421,677	8,101,412	1.286	4,481,321	582,572

2026	10,556,124		8,168,421	1.292	4,539,133	590,087
2027	10,684,916		8,235,512	1.297	4,594,514	597,287
2028	10,843,898		8,302,442	1.306	4,662,876	606,174
2029	10,932,912		8,368,915	1.306	4,701,152	611,150
2030	11,048,886		8,434,700	1.310	4,751,021	617,633
2031	11,161,373		8,498,716	1.313	4,799,390	623,921
2032	11,354,968		8,559,942	1.327	4,882,636	634,743

* Considerando la misma proporción de generación de RSOU per cápita de (CONSORCIO NCU- UAESP, 2018)

** factor de generación 130 lts. por kg de FORSU (SEMARNAT, SENER y la GIZ., 2018)

Fuente: Elaboración propia con datos (Bogota UAESP, 2021)

Estos datos reportados en el PGIRS actualizado a 2020 de la UAESP muestra el gran potencial de la valoración energética vía DA para la FORSU en Bogotá.

Estos residuos se generan en los hogares y actividades comerciales, insumos que pueden ser utilizados para una valorización energética de la fracción orgánica, en la implementación de procesos de aprovechamiento biológico mecánico con Digestión Anaeróbica (DA) para la generación de biogás y enriquecido a biometano.

4.2.PROGRAMAS DE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS

La alcaldía mayor de Bogotá y la UAESP en el plan de desarrollo Conoce el Plan De Desarrollo Distrital 2020-2024 “Un Nuevo Contrato Social y Ambiental para la Bogotá del Siglo XXI” (CONCEJO DE BOGOTÁ, 2020) establece entre las metas del “Propósito 2: Cambiar nuestros hábitos de vida para reverdecer a Bogotá y adaptarnos y mitigar la crisis climática” en el ítem 7 del programa estratégico “Cuidado y mantenimiento del ambiente construido” la necesidad de “formular e implementar un modelo de aprovechamiento de residuos para la ciudad, en la que se incluya aprovechamiento de residuos orgánicos...” esta es en gran medida un aliciente para desarrollar esta propuesta y proyectar escalarla a la administración distrital.

En Bogotá se aplica el Acuerdo 344 del 2008 “Por el cual se dispone, diseña y ejecuta un programa para la gestión de los residuos sólidos orgánicos”, (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2008) el cual ha generado una serie de iniciativas y cuyo avance está referenciado en el documento de avances del acuerdo 344 de 2008 (UAESP, 2020) estas iniciativas se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4 Iniciativas de aprovechamiento de FORSU. a 2017

Iniciativa	Recolección	Capacidad estimada
El Instituto para la Economía Social- IPES informa que suscribieron un convenio con la empresa IIA (Investigación Ingeniería Ambiental) quien realiza la recolección selectiva de residuos orgánicos en 9 plazas de mercado distritales para realizar su posterior aprovechamiento	Se recogen aproximadamente 350 toneladas/mes	20 toneladas/día.
La UAESP suscribió el Convenio Interadministrativo 565 del 2017 con la Universidad Nacional de Colombia, cuyo objeto consiste en: Aunar esfuerzos técnicos, humanos, financieros y administrativos con la Universidad Nacional de Colombia para implementar procesos de investigación para la transformación de residuos orgánicos, producto de este convenio se instaló una planta de investigación de transformación de residuos orgánicos en la vereda de Mochuelo Bajo-Ciudad Bolívar.	1 tonelada semanal de residuos orgánicos para un total aproximado de 6 toneladas	250kg/día
Con la implementación de los 94 módulos de aprovechamiento de residuos orgánicos a través de compostaje y lombricultivos que entregó la UAESP en el marco del Contrato Interadministrativo 369 de 2014	1,3 toneladas semanales	260 kg/día
En el marco del Convenio Interadministrativo 001 de 2015, suscrito entre la UAESP y el Jardín Botánico José Celestino Mutis, se planificó la instalación, puesta en marcha y operación de un biodigestor anaeróbico tipo "fermentación en seco", el cual es un proyecto piloto de investigación para la valoración energética de residuos orgánicos.	Este equipo no tiene periodicidad de funcionamiento.	2 ton/día

Un resultado de análisis de este proyecto es que de todos los procesos de aprovechamiento de residuos orgánicos referenciados se estima que de las **3.304 ton/día** de residuos orgánicos que ingresan al Relleno Sanitario Doña Juana, se están aprovechando únicamente **24 Ton/día** lo que representa un **0,72%**, dando margen al aprovechamiento energético del mismo.

CAPÍTULO 5: TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMETANO, CONSIDERACIONES TÉCNICAS, AMBIENTALES Y ECONÓMICAS:

La diferencia primordial de El apartado siguiente resume algunos aspectos técnicos importantes a considerar en los procesos de producción de biogás desarrollados internacionalmente.

2.1.1. Digestión anaeróbica (DA) seca y húmeda radica en el contenido en sólidos en el proceso: para la digestión anaerobia vía húmeda es necesario garantizar un alto contenido de humedad lo cual se logra preparando una suspensión añadiendo agua al sustrato, si es necesario, y la digestión anaerobia seca necesita que el sustrato en el digestor sea movido por acción mecánica o la recirculación del biogás generado. Para la DA húmeda, el contenido en materia seca del sustrato debe estar por debajo del 20%, lo cual es una característica de la FORSU en Bogotá, y para la DA seca el contenido de materia seca estará entre el 20% y el 40% (MITECO , 2019).

En el “Estudio de digestión anaeróbica seca y húmeda en planta piloto, para determinar el potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos generados en el municipio de Naucalpan de Juárez” (UNAM Departamento de Ingeniería Química, 2018), se determinan los fundamentos para elegir la tecnología de digestión en la construcción de una planta de tratamiento de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos y se concluye que; los residuos orgánicos con un porcentaje de humedad alto, deben manejarse de tal manera que los lixiviados generados se capten y se incorporen en el proceso de digestión anaeróbica, ya que cuentan con materiales biodegradables, además de una elevada humedad, lo que hace que puedan ser aprovechados en el proceso de digestión como agua de dilución, disminuyendo la cantidad de agua cruda requerida en el pretratamiento de sustratos que se procesen mediante digestión húmeda, el caso de la FORSU de Bogotá, cumple estos parámetros recomendados los que la hace factible para este tipo de proceso.

La caracterización de los residuos sólidos urbanos en Bogotá (CONSORCIO NCU- UAESP, 2018) y su Bajo contenido de materia seca (UAESP, 2012) lleva a que, de acuerdo con la literatura consultada y las razones esgrimidas, el proceso de El apartado siguiente resume algunos aspectos técnicos importantes a considerar en los procesos de producción de biogás desarrollados internacionalmente.

2.1.1. Digestión anaeróbica (DA) escogido sea vía húmeda.

5.1 TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA FORSU EN FASE HÚMEDA.

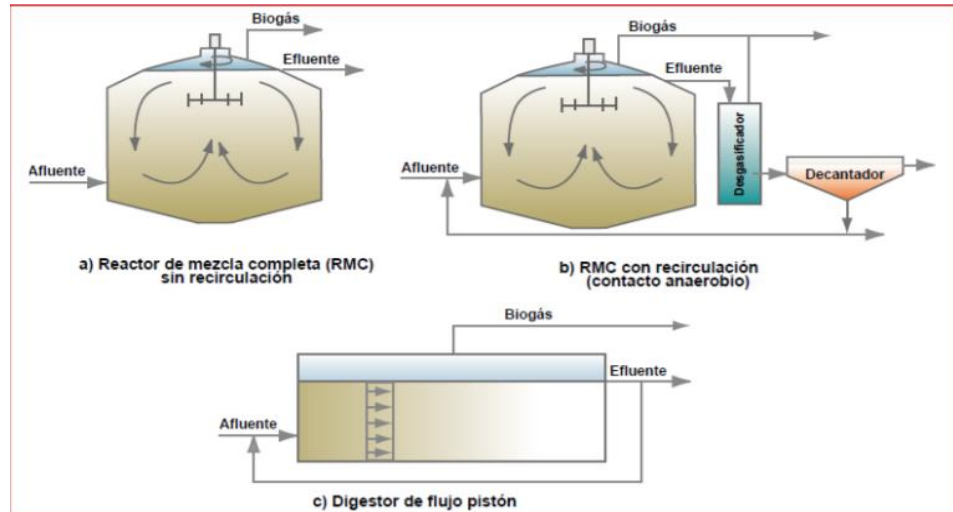
La publicación del Instituto para la diversificación y ahorro de la energía IDAE de España, de la serie energías renovables – energía de la biomasa, (IDAE, 2007) referencia diversos tipos de biorreactores y diferentes tecnologías aplicables para la digestión anaeróbica en fase húmeda, los cuales pueden clasificarse en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el reactor, siguiendo diferentes métodos.

5.1.1. Reactor de mezcla completa sin recirculación (RMC)

Es un reactor cuya característica principal es mantener la distribución uniforme de concentraciones, tanto de la biomasa a tratar como del grupo de bacterias, lo cual se logra por un

sistema agitado el cual puede ser inducido por agitadores de hélice o palas, o en forma neumática mediante recirculación de biogás inyectado a presión, la figura 2 a) de la Ilustración 2 presenta un esquema simplificado del reactor RMC, el cual es el más utilizado para residuos sólidos.

Ilustración 2 Esquema de reactores de mezcla para la producción de biogás



Fuente: (IDAE, 2007)

En la Ilustración 2 faltaba referenciar los reactores de flujo pistón que se esquematizan en la figura 2c) allí, la tasa de crecimiento de bacterias es más elevada a la entrada del reactor, donde la concentración de biomasa también es más elevada la cual hace que la concentración media en el reactor sea superior a la correspondiente al reactor de mezcla completa y superior a la de salida con lo cual el tiempo de retención será inferior. Este tipo de reactor ha sido aplicado a diferentes tipos de residuos orgánicos, como FORSU.

5.1.2. Reactor de mezcla completa con recirculación

En la figura 2 b) de la Ilustración 2, se muestra el reactor anaerobio de contacto y es el equivalente al sistema de lodos activos aerobios para el tratamiento de aguas residuales.

Regulando la recirculación del sustrato es factible conseguir TRH tiempos de retención hidráulica menores que en un reactor de mezcla completa, lo cual incrementa el tiempo de retención de las bacterias por su confinamiento en el sistema por medio de una adecuada separación en el decantador y recirculación, estas características de separación de las bacterias en las diferentes etapas en el decantador hacen que este sistema sólo sea aplicable a aguas residuales con alta carga orgánica.

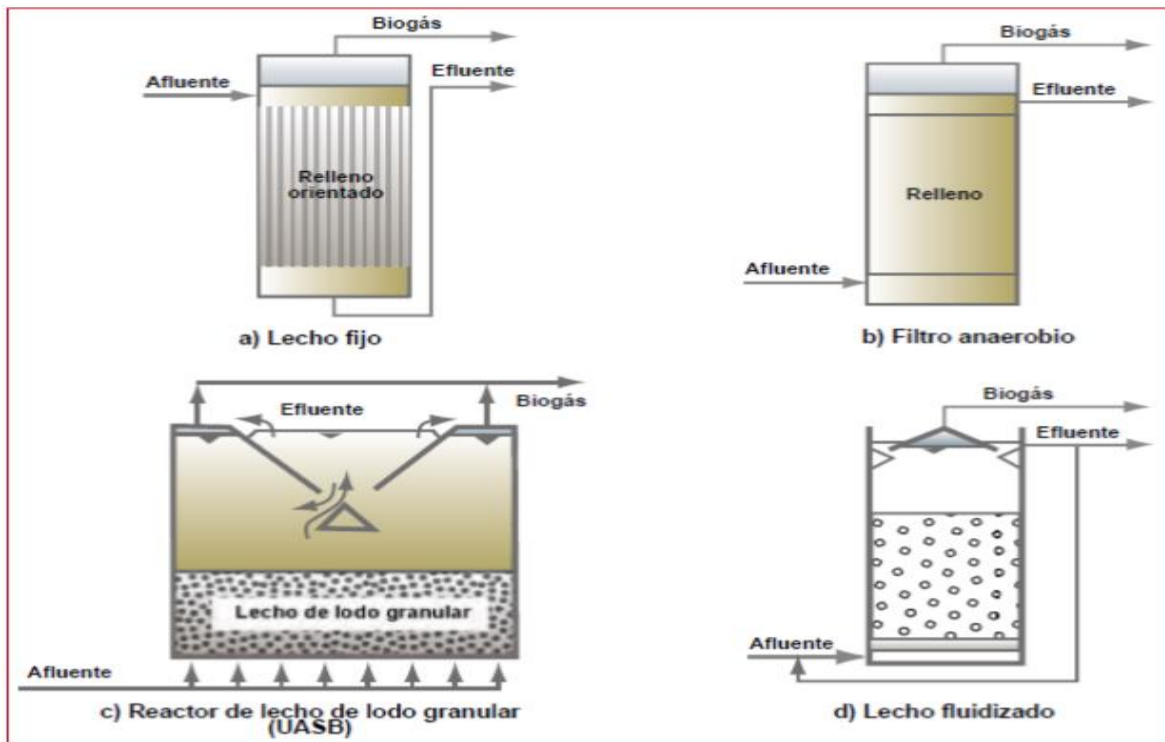
5.1.3. Reactor con retención de biomasa, sin recirculación.

Otros equipos y procesos hacen posible la adecuada retención de grupos de bacterias en el interior del reactor por separado, evitando mezcla completa, esto conlleva una reducción del tiempo de retención (TRH) menor al debajo del reactor RMC referenciado. Existen diversos métodos de retención de biomasa los cuales son básicamente: -a) de inmovilización sobre un soporte los cuales puede ser de filtros anaerobios y lechos fluidizados y -b) la agregación o floculación de la biomasa y mediante retención por gravedad tal como los reactores de lecho de lodos.

Estos sistemas se esquematizan en la .

Ilustración 3.

Ilustración 3 Reactores con retención de biomasa.



Fuente: (IDAE, 2007)

En la gráfica 3b) de la Ilustración 3, se muestra el reactor de filtro anaerobio, este sistema está caracterizado por que las bacterias anaerobias de las diferentes etapas del proceso están fijadas a la superficie de un soporte inerte, mediante la formación de biopelículas en los intersticios del relleno en flujo vertical. El soporte generalmente es de material cerámico o plástico tipo anillos Raschig. Su distribución puede ser regular y orientado verticalmente y la actividad es debida básicamente a las bacterias fijadas, recibiendo el nombre de lecho fijo con flujo descendente figura 3a) de la Ilustración 3.

El reactor de lecho de lodos mostrado en la figura 3c) de la Ilustración 3 en este sistema se favorece la floculación de bacterias entre ellas formando consorcios lo que hace que por sedimentación se mantengan en el interior del reactor, con una velocidad de ascenso requerida del flujo lo que requiere que en la parte superior exista un separador de fases sólida-biomasa/líquido/gas. El diseño más conocido es el (UASB) Upflow Anaerobic Sludge Blanket el cual se usa regularmente en el tratamiento de aguas residuales de la industria alimentaria y se presenta en la figura 3c) de la Ilustración 3.

En la figura 3d) de la Ilustración 3 se esquematiza el reactor de lecho fluidizado en el cual las bacterias se encuentran fijas mediante la formación de una biopelícula sobre la superficie de las partículas de material inerte y este se mantiene fluidizado con un adecuado flujo ascendente del fluido.

5.1.4. Otros sistemas.

Los reactores anteriores pueden ser combinados para conseguir sistemas más eficientes, según el tipo de residuo a tratar, para este estudio se limita al FORSU por lo cual este apartado considerara las posibilidades existentes.

5.1.4.1 Sistemas de dos etapas

Consisten en un primer reactor o tanque con elevado tiempo de retención el cual desarrolla la etapa de hidrólisis y a continuación está un reactor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Este sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el hidrolizados como reactor discontinuo y controla la temperatura del efluente del segundo reactor, las aplicaciones más frecuentes están en el tratamiento de residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis generalmente frutas, verduras, y la FORSU.

5.2 TIPO DE TECNOLOGÍAS APLICABLES A FORSU, VENTAJAS Y DESVENTAJAS, CAPACIDADES.

En las pasadas secciones se presentó la base teórica de la reacción de Digestión Anaeróbica (DA) los tipos de reactores y sistemas y se argumentó acerca del uso de DA via húmeda para FORSU como la de Bogotá, en la sección siguiente se describe la tecnología que se considera inicialmente como la más óptima teniendo en cuenta los antecedentes presentados haciendo énfasis en la generación de biogás.

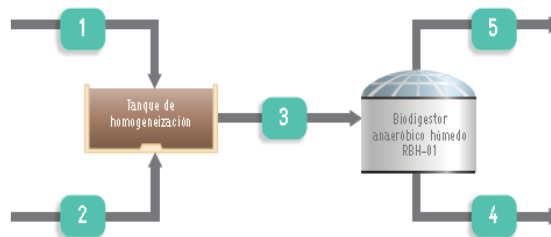
Diversas tecnologías se han desarrollado en el ámbito agroindustrial para la generación de biogás y enriquecimiento a biometano de la FORSU, durante los últimos años. (Montes Carmona, 2008) y las plantas de DA de la FORSU presentan básicamente el mismo esquema de flujo. Así es posible distinguir las fases de tratamiento siguientes, que son comunes en todas:

a) Una sección inicial de selección y apartado de materiales de acuerdo con el origen y la selección en la fuente de generación de la FORSU que llega a la planta.

b) Una sección de acondicionamiento del sustrato a tratar lo cual comprende esencialmente; -una reducción del tamaño, -mezclado con recirculado ya sea en fase líquido o sólida. Es esta etapa del proceso la que distingue las diferentes tecnologías y equipos comerciales las cuales han producido sus propias patentes relacionadas con el equipo utilizado, además es en esta etapa la clave para ajustar el contenido de sólidos totales del sustrato alimentado al digester.

c) La sección de biogásificación. El corazón del proceso de biometanización y para la cual cada tecnología ha patentado el tipo de reactor, el sistema de mezclado, de recirculación y demás.

Ilustración 4 Esquema simplificado y balance de la operación del digester húmedo



Fuente: (IDAE, 2007)

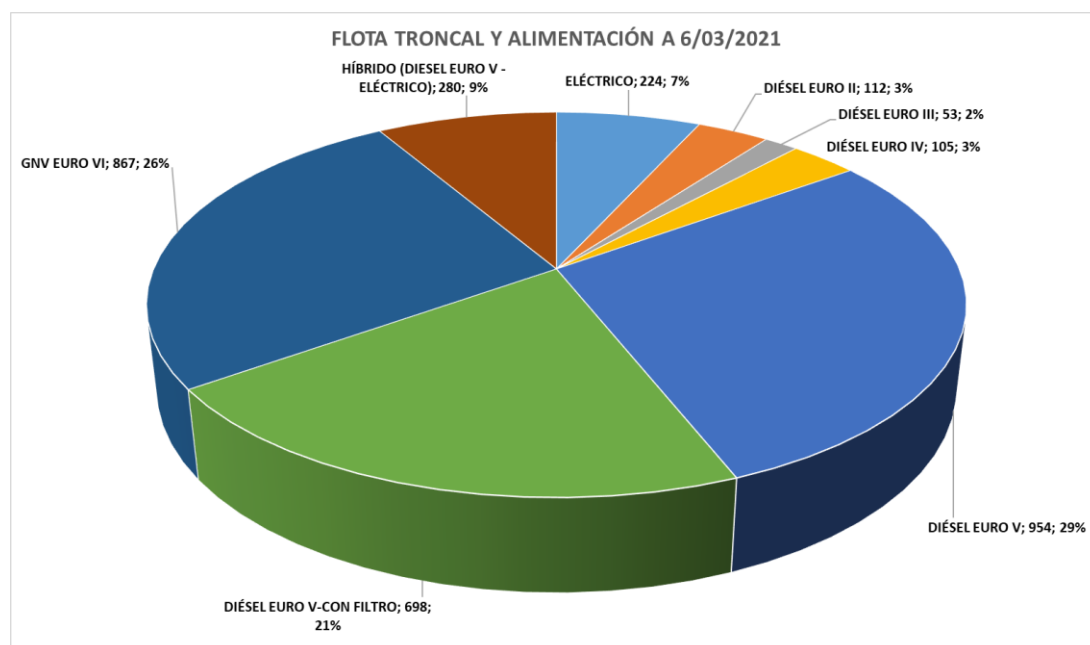
d) Una sección de alistamiento del biogás, para enriquecerlo y comprimirlo a las condiciones adecuadas para su uso o almacenamiento.

e) Una sección de tratamiento del digestato de las corrientes gaseosas y de la planta mediante filtración biológica para evitar la salida de olores ofensivos al exterior.

CAPITULO 6. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE PÚBLICO SITP CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS, CONSUMO ESPECÍFICO Y TIPO DE FLOTA.

La Ilustración 5 muestra la composición actual del sistema integrado de transporte público SITP y en la en Tabla se especifica la distribución de la flota por tecnología y porcentaje información facilitada por (SITP, 2020)

Ilustración 5 Flota Troncal y alimentación a marzo 6 de 2021.



Fuente: (Rodríguez, 2021)

El total de flota a marzo de 2021 es de 3293 buses de los cuales 867 son de tecnología a Gas Natural Vehicular lo que corresponde al 26,3% de la flota y los cuales son el objeto de este estudio.

De acuerdo con información de Transmilenio S.A. la distribución por tipo y rendimiento de muestra en la Tabla 5 la cual ilustra la potencialidad de uso del biometano como completaría en la flota del SITP

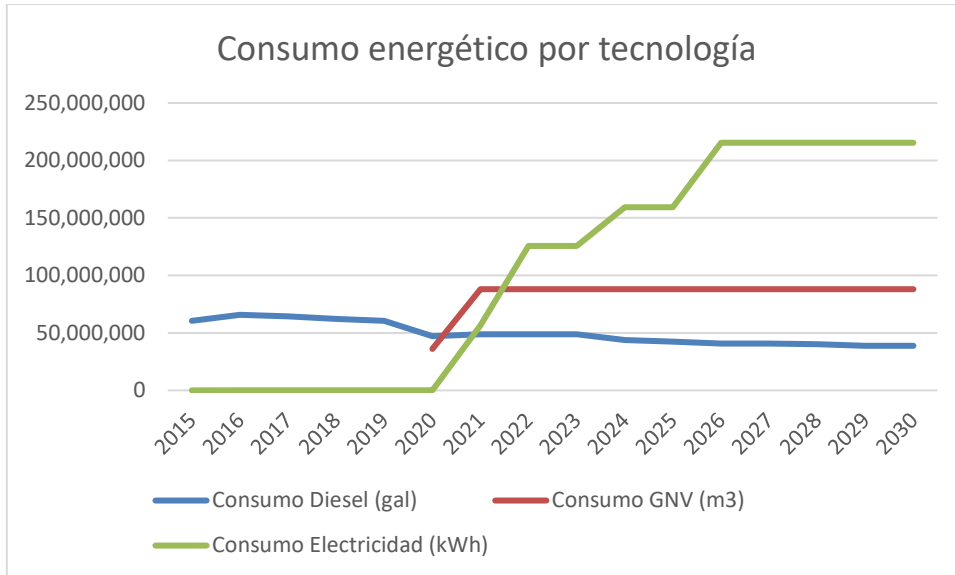
Tabla 5 Flota y rendimiento a Gas Natural

Flota buses SITP a Gas Natural	Prom. kms/mes	Rec. kms/año-bus	Kms/m3
Articulado	7420,75	89049,1	1,67
Biarticulado	7004,37	84052,5	1,42
Padrón de alimentación	4942,2	59306,5	1,5
Bus	4983,9	59807,1	2,8

Fuente: (Rodríguez, 2021)

Se obtuvo información de la proyección de consumo energético Tabla 6 para las diferentes tecnologías consideradas.

Tabla 6 Consumo energético por tecnología



Fuente: (Rodriguez, 2021)

La información suministrada para esta propuesta de trabajo de investigación evidencia la oportunidad de proponer diferentes tecnologías y procesos de Digestión anaeróbica vía húmeda y demuestra el gran potencial existente 5tanto en la FORSU y las proyecciones desarrolladas por la UAESP como Transmilenio para un óptimo y retador desarrollo de esta propuesta.

CAPÍTULO 7. IDENTIFICACIÓN Y EVALUACION MULTICRITERIOS DE LAS TECNOLOGÍAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y PURIFICACIÓN A BIOMETANO.

7.1 EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE LAS TECNOLOGÍAS DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA.

Existen diversas formas de abordar un problema de decisión de alternativas entre los cuales una forma acorde de abordaje son los métodos de evaluación y decisión multicriterio las cuales pueden ayudar a la selección de la solución óptima entre un conjunto de alternativas factibles, con base en un conjunto de criterios cualitativos y/o cuantitativos a ser optimizados mediante la optimización de funciones objetivo-simultáneas.

Uno de los documentos consultados para el desarrollo de esta propuesta es el proyecto de investigación realizado por la Unidad de Proyectos y de Investigación en Ingeniería Ambiental del Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) denominado “Estudio de digestión anaeróbica seca y húmeda en planta piloto, para determinar el potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos generados en el municipio de Naucalpan de Juárez”, (SEMARNAT, SENER y la GIZ., 2018) en el apartado del documento de “Fundamentos para elegir la tecnología de digestión en la construcción de una planta de tratamiento de FORSU”, se desarrolló un análisis con este fin el cual hace uso del aplicativo de evaluación multicriterio Visual PROMETHEE (PROMETHEE-GAIA , 2021).

Este trabajo sigue los lineamientos establecidos en el documento referenciado aplicadas a las tecnologías de digestión anaeróbica, las cuales se llevan a cabo mediante el desarrollo del esquema resumido a continuación:

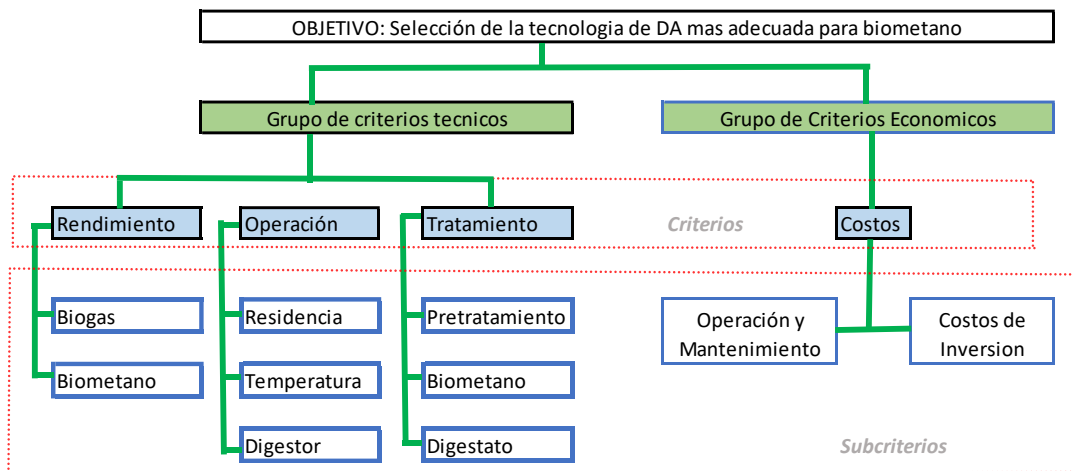
7.1.1 Diagrama Jerárquico: Para comenzar con la evaluación multicriterio, se requiere plantear factores relevantes que permiten calificar el desempeño de las tecnologías de DA Húmeda para evaluar, es necesario precisar que en el apartado precedente se estableció la conveniencia de evaluar tecnologías de DA vía húmeda, por lo tanto, se estableció un diagrama jerárquico partiendo del objetivo principal, el cual es la selección de la tecnología de DA húmeda más adecuadas para tratar la FORSU de Bogotá.

Se establecen los grupos principales: - Grupo de Criterios Técnicos y - Grupo de Criterios Económicos. Se plantea la inclusión del Grupo Criterios Ambientales para evaluar los impactos al ambiente de cada tecnología referenciada en el documento catálogo de tecnologías e empresas de biogás (Thieme , 2015), tomando en cuenta sus emisiones de CO₂, la necesidad de agua a usar en el proceso y los contaminantes emitidos, sin embargo, no se cuenta con la información específica suficiente de cada tecnología que permita realizar un comparativo entre todas ellas para lo cual se desarrolla con la información disponible.

El Grupo Criterios Técnicos se divide en Rendimiento, Operación y Tratamientos, mientras que para el Grupo Criterios Económicos sólo se toma en cuenta la división de Costos.

En la Ilustración 6 se presenta el diagrama jerárquico que representa este problema de evaluación multicriterio.

Ilustración 6 Diagrama jerárquico para la evaluación multicriterio



Fuente: Elaboración propia con base en (SEMARNAT, SENER y la GIZ., 2018)

7.2 TECNOLOGIAS ESCOGIDAS PARA EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA.

Del catálogo Probiogas referenciado (Thieme , 2015) y del Estudio de digestión anaeróbica seca y húmeda en planta piloto, para determinar el potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos generados en el municipio de Naucalpan de Juárez (SEMARNAT, SENER y la GIZ., 2018) se han escogido las cuatro tecnologías comerciales para desarrollar el ejercicio de ponderación de criterios, estas fueron WELTEC, BTA, BRV y GICON, las cuales a nivel internacional son de las más importantes y han ganado prestigio debido a su experiencia e innovación, y que han dado buenos resultados en el tratamiento de la fracción orgánica de la FORSU.

7.3 DEFINICIÓN Y PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS Y SUS VARIABLES.

La definición de criterios se establece por niveles, - se realiza la ponderación de peso a los grupos de criterios, - los criterios y - los subcriterios.

- Grupo de Criterios Técnicos se consideraron las siguientes divisiones:
 - *Rendimiento.* Capacidad de cada tecnología para convertir la FORSU en productos de la digestión anaeróbica con alto valor agregado.
 - *Operación.* Las características que cuantifican la dificultad para operarlo y mantenerlo.

- *Tratamientos.* Tanto los que reciben los residuos orgánicos como los productos y subproductos producidos.

- Para cada uno de los tres subcriterios con escala cualitativa se definió una relación de cinco niveles en la Tabla 7 se presenta la definición de los subcriterios que corresponden a cada criterio técnico.

-*Digestor:* Se define la escala con base en la de complejidad de operación del digestor según sus etapas o mezclado y su continuidad Tabla 8

-*Pretratamiento:* Se establece una escala que cuantifica la complejidad del pretratamiento que requieren los residuos orgánicos para que el proceso se lleve a cabo de manera eficiente, según el número de secciones que típicamente presenta una planta de cada tecnología Tabla 9

-*Digestato:* se establece una escala de calificación en la que evalúa la calidad del subproducto según los tratamientos que recibe después del proceso de digestión anaeróbica Tabla 0

El Grupo de Criterios Económicos deriva en Costos y este rubro en subcriterios de Costos de Inversión y de Costos de Operación y Mantenimiento, para ellos se considera el costo de la tecnología tomando como referencia la inversión total que en promedio se realiza para cada una, según las toneladas de residuos orgánicos que degrada al año y también se tomaron en cuenta los gastos por la operación y el mantenimiento Tabla 1 que incluye los costos relacionados con plantas, salarios de los empleados, materiales y las instalaciones, el transporte y los gastos de alquiler y de arrendamientos de tierra. El CO&M oscila entre 3 y 5 % (MARTÍNEZ GARCÍA, 2014) del costo total de la inversión, por lo que se recurre a este estimado a partir de un porcentaje de la inversión de la planta de digestión anaeróbica húmeda.

Tabla 7 Grupo de Criterios Técnicos: Descripción de criterios y subcriterios

Subcriterios	Descripción	Tipo de escala
Rendimiento		
Biogás	Producción de biogás en Nm ³ por tonelada de residuo tratado	Cuantitativa
Biometano	Producción de biometano en Nm ³ por tonelada de residuo tratado	Cuantitativa
Operación		
Sólidos	Porcentaje máximo permisible de ST a la entrada del digestor	Cuantitativa
Residencia	Tiempo de residencia de operación del digestor en días	Cuantitativa
Temperatura	Temperatura de operación del digestor en °C	Cuantitativa
Digestor	Cuantifica la dificultad de operación del digestor según sus etapas, su mezclado y su continuidad	Cualitativa
Tratamiento		
Pretratamiento	Cuantifica la dificultad del pretratamiento según el número de secciones que posee	Cualitativa
Biometano	Determina si la tecnología cuenta con la posibilidad de elevar el grado del biogás a biometano	Sí/No
Digestato	Cuantifica la calidad del tratamiento que recibe el digestato según el subproducto que ofrece cada tecnología	Cualitativa

Fuente: Elaboración propia basado en (SEMARNAT, SENER y la GIZ., 2018)

Tabla 8 Escala de complejidad del subcriterio ‘digestor’

Escala	Descripción
Muy complejo	Inyección de biogás / Continuo
Complejo	Dos etapas / Continuo
Promedio	Recirculación / Continuo
Sencillo	Agitación mecánica / Continuo
Muy sencillo	Sin mezclado / Por lotes

Tabla 9 Escala de complejidad del subcriterio ‘pretratamiento’

Escala	Descripción
Muy complejo	Más de 5 secciones de pretratamiento
Complejo	5 secciones de pretratamiento
Promedio	3 secciones de pretratamiento
Sencillo	1 sección de pretratamiento
Muy sencillo	Sin pretratamiento

Tabla 10 Escala de complejidad del subcriterio ‘digestato’

Escala	Descripción
Muy malo	Sin tratamiento
Malo	Separación sólida/líquido
Promedio	Digestato a tratamiento aeróbico
Bueno	Digestato alto grado
Muy bueno	Composta de alto grado y fertilizante líquido

Tabla 11 Descripción de criterios económicos

Criterios	Descripción	Tipo de escala
Costos de Inversión	Es la inversión total del proyecto por tonelada de residuo tratada	Cuantitativa
Costos de Operación y Mantenimiento	Son los costos de operación y mantenimiento por tonelada tratada de residuo	Cuantitativa

Fuente: Elaboración propia basada en (SEMARNAT, SENER y la GIZ., 2018)

7.4 ASIGNACIÓN DE PESOS ESPECÍFICOS

La ponderación de los Grupos de Criterios utilizada en la evaluación se muestra en la Tabla 2 en ella el Grupo de Criterios Técnicos tiene mayor peso debido a que considera aspectos que afectan directamente al Grupo de Criterios Económicos, además de que los datos encontrados para este último pueden variar significativamente para dos plantas de capacidad similar de una misma tecnología. De acuerdo con el documento de “bases biotecnológicas y análisis de tecnologías de la digestión anaerobia para el tratamiento de los residuos sólidos municipales, RSOM (Omar, 2014) se hace una ponderación de criterios para la aplicación del software Visual Promethee.

Tabla 12 Ponderación de los Grupos de Criterios

Grupo	Criterio	Peso
-------	----------	------

Técnicos	Rendimiento	40 %
	Operación	30 %
	Tratamientos	30 %
Subtotal		70%
Económicos	Costos	30 %
TOTAL		100%

Posteriormente, de los criterios técnicos se define el peso de cada subcriterio Tabla 43, comenzando por asignar ponderaciones, dando ligeramente mayor importancia a Rendimiento con un 40 %, y a Operación y a Tratamientos se les da un 30 % a cada uno.

Tabla 43 Ponderación de los subcriterios del Grupo de Criterios Técnicos

Criterio	Subcriterio	Peso en cada criterio
Rendimiento	Biogás	50%
	Biometano	20%
	Consumo Energético	30%
	<i>Subtotal</i>	40%
Operación	Residencia	20 %
	Temperatura	30%
	Sólidos	30%
	Digestor	20%
	<i>Subtotal</i>	30%
Tratamientos	Pretratamiento	40%
	Biometano	40%
	Digestato	20%
	<i>Subtotal</i>	30%
Total		100 %

Por último, se definen los pesos de los subcriterios del Grupo de Criterios Económicos Tabla 54. En este caso se le asignó un mayor porcentaje a los Costos de Inversión, debido a que es el que mayor impacto tiene en esta evaluación y a que los costos de operación se obtuvieron por medio de una aproximación, como se explicó anteriormente.

Tabla 54 Ponderación de los subcriterios económicos

Criterio	Subcriterio	Peso
Costos	Costos de Inversión	60 %
	Costos de Operación y Mantenimiento	40 %
Total		100

7.5 MATRIZ DE EVALUACIÓN

Una vez definidos los criterios, subcriterios y los valores reportados para cada tecnología de acuerdo con el catálogo de tecnologías e empresas de biogás (Thieme , 2015) y del estudio de la UNAM se estandarizan y homogenizan los datos para cargarlos al aplicativo Visual PROMETHEE referenciado

Tabla 65 Parámetros principales de las tecnologías escogidas

Criterios		Unidades	TECNOLOGIAS HUMEDAS				
			BTA	WELTEC	BRV	GICON	
Técnicos	Rendimiento	Biogás	Nm3/Ton	90	120	115	100
		Biometano	Nm3/Ton	53	72	63	63
		Consumo Energético	kwh/Ton	20	10	12	120
	Operación	Residencia	Días	15	17	25	21
		Temperatura	°C	37	55	38	37
		Sólidos	%	10	10	8	10
		Digestor	N.A.	Complejo	Promedio	Complejo	Muy Complejo
	Tratamientos	Pretratamiento	N.A.	Complejo	Promedio	Promedio	Promedio
		Biometano	N.A.	no	si	si	si
		Digestato	N.A.	Promedio	Malo	Muy Bueno	Promedio
Económicos	Costos	Costos de Inversión	U\$D año/Ton	610	373	562	512
		Costos de Operación y Mantenimiento	U\$D año/Ton	92	56	83	77

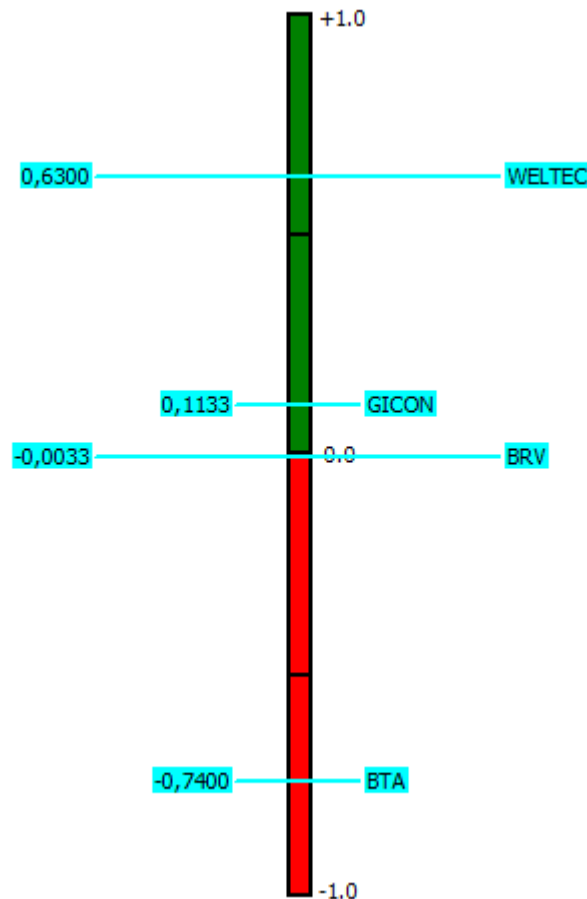
Fuente: Propia con datos del catálogo de biogás referenciado.

Tabla 65 Parámetros principales de las tecnologías escogidas están resumidas las características específicas para cada tecnología considerada y cuyas características establecen los diferentes criterios de decisión evaluación con la metodología de evaluación multicriterio referenciada.

7.6 CONCLUSIONES DE LA PRUEBA MULTICRITERIO

Se realizó una evaluación multicriterio de diferentes tecnologías de digestión anaeróbica para el tratamiento de la FORSU que fueran relevantes en la actualidad a nivel mundial. (Thieme Elisa, 2015) Esta evaluación fue realizada utilizando como herramienta el programa de cómputo derivado de esta metodología, llamado Visual PROMETHEE, el cual proporcionó un mayor panorama sobre las características de cada tecnología evaluada, puesto que se logró comparar, clasificar y calificar a éstas de una manera objetiva.

Ilustración 7 Ordenamiento prueba multicriterio



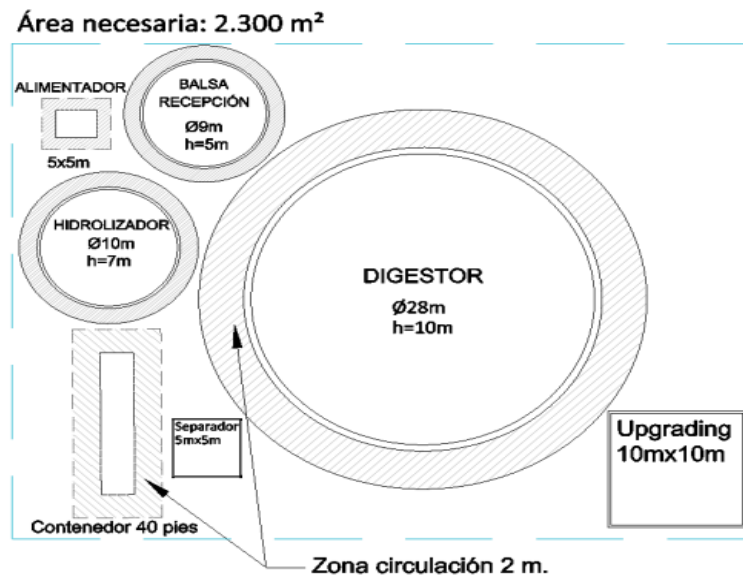
Fuente: Salida del aplicativo Prometheea

Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que, de acuerdo con las tecnologías seleccionadas y a los datos recabados en este trabajo, existe una tecnología que resulte significativamente superior a las demás, pero existen criterios adicionales de más difícil comparación, que deben considerarse antes de implementar esta u otra tecnología. Ilustración 7

La tecnología que se seleccione deberá considerar un adecuado sistema de separación de residuos y la disponibilidad de agua en el sitio de construcción, por mencionar algunos de los aspectos relevantes.

De información obtenida de diferentes proyectos se hace un estimativo de costos de un proceso típico vía húmeda el cual se muestra en Ilustración 8 se presenta el costo total de una planta de Digestión Anaerobia basada en el proceso vía húmeda genérica que, según la evaluación tecnológica, resultó ser la más factible para tratar a los residuos sólidos orgánicos urbanos FORSU. El proyecto considera un digestor anaerobio capaz de tratar 50 ton/día, y un tiempo de retención de 20 días.

Ilustración 8 Esquema de planta de sistema de DA vía húmeda 50 Ton/día.



Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 8. ANÁLISIS DE EXTERNALIDADES Y LA FACTIBILIDAD DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y BIOMETANO.

Este apartado muestra el análisis de costos y beneficios atribuibles al proyecto y con ellos se hace la evaluación económica y el análisis costo beneficio y se estiman los indicadores financieros para poder dar un concepto de viabilidad del proyecto.

Enseguida se presenta la formulación de los componentes principales (costos y beneficios anuales) para la estimación del flujo de efectivo. Dichos datos nos permiten realizar el ejercicio de evaluación financiera y socioeconómica del proyecto, de modo que, para medir la rentabilidad de este desde el punto de vista social, se calcularon los indicadores del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) y se realizó un análisis de sensibilidad utilizando un horizonte de evaluación de 20 años.

8.1 ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO.

La propuesta de valoración de costos globales asociados se basa en información consultada en diversos proyectos que se presentan para aplicar a los incentivos de la Ley 1715 de 2014 referenciados.

Estos valores incluyen la estimación básica de la inversión en obra e infraestructura civil teniendo en cuenta que se presupone que la instalación se plantea desarrollarla en los terrenos que cuenta la UAESP en el relleno sanitario Doña Juana.

De información obtenida de diferentes proyectos se hace un estimativo de costos de un proceso típico vía húmeda el cual se muestra en la Tabla 16 se presenta el costo total de una planta de Digestión Anaerobia basada en el proceso vía húmeda genérica que, según la evaluación tecnológica, resultó ser la más factible para tratar la FORSU.

El proyecto considera un digester anaerobio capaz de tratar 50 ton/día, y un tiempo de retención de 20 días.

Tabla 16 Costo total de una planta de DA, sistema húmedo

Activos	USD \$
Obra e infraestructura civil	596.062
Recepción y pretratamiento de los FORSU	235.637
Digestor	748.543
Separador	249.514
Sistema de limpieza del biogás	241.197
Sistemas de control y supervisión	612.142
Otros subsistemas	256.445
Sistema de deshidratación	217.245
TOTAL	3.156.785

Fuente: Elaboración propia con datos de proyectos UPME

De acuerdo con la consideración referenciada (MARTÍNEZ GARCÍA, 2014) se estima los costos de operación y mantenimiento de 5% de la inversión lo cual se estima en USD \$ 157.839 anuales.

8.2 BENEFICIOS ESTIMADOS.

Los proyectos de tratamiento de residuos sólidos urbanos generan muchos beneficios del orden social, ambiental, sanitarios, financieros etc. La metodología a abordar considera prioritariamente los beneficios financieros potenciales teniendo en cuenta un análisis privado del proyecto bajo el esquema de indicadores de rentabilidad para el operador de la planta de disposición de Doña Juana.

1. *Costos evitados de disposición final:* De acuerdo con la información reportada en el estudio Análisis de Impacto Normativo - AIN, “Analizar las medidas regulatorias para la incorporación de los costos ambientales en los nuevos marcos tarifarios del servicio público de aseo”, (CRA, 2020) se establece el costo de disposición por tonelada incorporando el incentivo – CDF (VIAT) por relleno sanitario para Doña Juana estimado en USD 15 /Ton. de RSU, lo que representa para las 50 toneladas de base de cálculo para el proceso de DA es de USD 755.68 por día, con estos datos se estima que Bogotá paga anualmente USD 275.822 y este dinero hasta la fecha no se ha visto recuperado. Por ello se hace necesaria la oportunidad de buscar alternativas que permitan recuperar la inversión realizada en el tratamiento y disposición final de los residuos sólidos orgánicos urbanos.

2. *Venta de biometano:* Se estima que uno de los mayores beneficios se obtiene de la venta de biometano como Gas Natural Vehicular el valor promedio reportado por Vanti (VANTI, 2021) es de USD 0.48 por m³, y se estima que la producción promedio de biogás de FORSU es de 130 m³/Ton (SEMARNAT, SENER y la GIZ., 2018), con un contenido de metano del 60%.

3. *Venta de bonos de carbono:* El proyecto de ley de reforma tributaria (CONGRESO DE COLOMBIA, 2021), presentado en abril de 2021 establece en su artículo 222 “ARTÍCULO 222. BASE GRAVABLE Y TARIFA. El impuesto nacional al carbono tendrá una tarifa específica considerando el factor de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) para cada combustible determinado, expresado en unidad de peso (kilogramo de CO₂eq) por unidad energética (Tera julios), de acuerdo con el volumen o peso del combustible. La tarifa corresponderá a diecisiete mil seiscientos sesenta pesos (\$17.660) por tonelada de carbono equivalente (CO₂eq). Los valores de la tarifa por unidad de combustible serán los siguientes, mostrados en Tabla 17

Tabla 17 tarifas Impuesto al Carbono propuesta

Combustible fósil	Unidad	Tarifa/unidad
Gas natural	Metro cúbico	\$ 34
Gas licuado de petróleo	Galón	\$ 112
Gasolina	Galón	\$ 159
Kerosene	Galón	\$ 170
Jet fuel	Galón	\$ 174
ACPM	Galón	\$ 179
Fuel oíl	Galón	\$ 208

Carbón Térmico	Tonelada	\$ 41,861
----------------	----------	-----------

Fuente: Texto reforma tributaria presentada.

Los costos evitados hacen referencia al impuesto al carbono, que será el potencial de comercializar las emisiones evitadas por el uso del biometano. Decreto 926 de 2017 (MHCP, 2017), el cual tiene por objeto reglamentar el procedimiento para hacer efectiva la no causación del impuesto nacional al carbono y reglamentar el procedimiento para certificar ser carbono neutro. En ella se establece la posibilidad de comercializar bonos de carbono de energías renovables como el biometano.

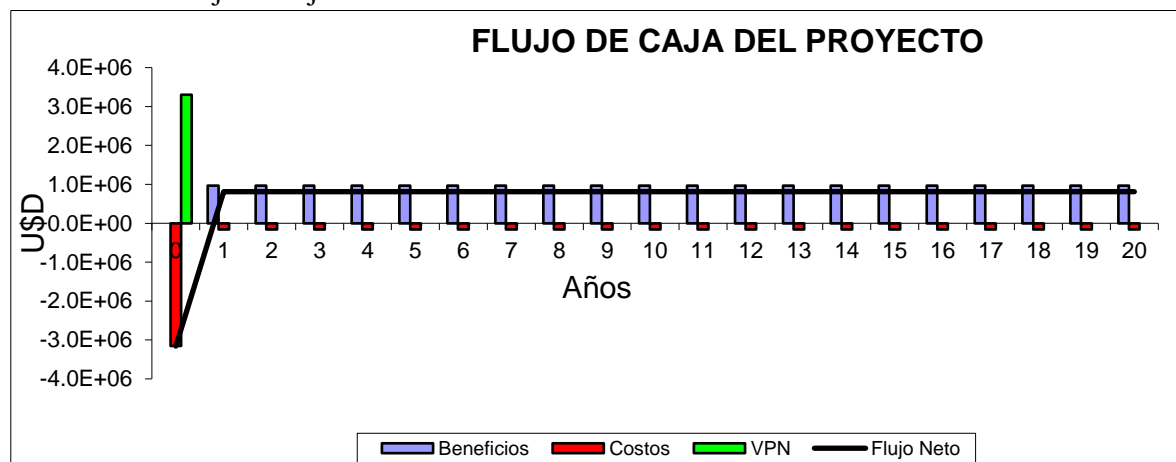
Esta evaluación del flujo de fondos propuesto con un horizonte de evaluación a 20 años, con los criterios considerados, establece indicadores de rentabilidad, como se muestra en Tabla 17.

Tabla 17 Indicadores de rentabilidad del proyecto.

FLUJO NETO	3.299.704
TIRE	25,4%
RBC	1,7

Un flujo neto o valor presente neto positivo medido en dólares, lo cual avala la rentabilidad del proyecto, así como una tasa interna de retorno TIRE muy superior a la inversión pública considerada del 12% y lo más notorio en este caso, una relación beneficio costo de 1.7 lo cual nos indica que por cada dólar invertido en el proyecto se reciben 1.7 de retorno estos indicadores muestran la bondad de inversiones de este tipo.

Ilustración 9 Flujo de caja



Como resultado de la evaluación económica del proyecto de Digestión Anaerobia, los indicadores muestran una buena rentabilidad. Con base en estos, se deduce que el proyecto es rentable desde el punto de vista económico, pues genera la utilidad necesaria para recuperar la inversión, y se garantizó una vida útil de 20 años.

En proyectos analizados en la actualidad se muestra que el costo de los digestores anaerobios va disminuyendo y con el tiempo y las políticas establecidas para su aprovechamiento en el tratamiento de FORSU se han desarrollado impulsados por la política de incentivos en el país, lo que los hace mucho más viables.

La Digestión Anaerobia, además de generar biogás, produce un subproducto valorizable denominado digestato el cual es rico en nutrientes (nitrógeno, potasio y fosforo), que puede ser empleado como mejorador de suelos en la agricultura y reducir los costos a los productores locales.

De acuerdo con la evaluación desarrollada y el análisis de factibilidad con las consideraciones establecidas y las tecnologías evaluadas es muy favorable el desarrollo de un piloto de producción de biogás y su consiguiente enriquecimiento a biometano para ser utilizado en el sistema Transmilenio.

Un escenario alternativo a considerar es establecer la cuantificación de beneficios resultantes del proyecto considerado como externalidades los cuales serían:

- Estimación de la disponibilidad a pagar por disminución de vectores y olores ofensivos en las inmediaciones del Relleno Sanitario Doña Juana.
- Costos evitados en salud por la disminución de infecciones de origen en los residuos sólidos urbanos mal dispuestos.
- Empleos generados por la implementación de la tecnología de producción de biogás.
- Mejora en la percepción de responsabilidad social ambiental del operador del RSDJ.

CAPITULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El trabajo consistió en realizar una propuesta evaluar técnica y económicamente la producción de biometano a partir de FORSU en para ser utilizado en el sistema integrado de transporte público de Bogotá (SITP), mediante el tratamiento de información secundaria y el uso de herramientas de evaluación multicriterio de Digestión Anaerobia de residuos sólidos urbanos. Se busca que la propuesta metodológica sirva para futuros proyectos de DA considerando diversas fuentes de biomasa residual.

Se propone una matriz de decisiones para ser empleada en la comparación y evolución de diferentes tecnologías de Digestión Anaerobia, mediante criterios técnicos, económicos y ambientales. La metodología de toma de decisiones puede emplearse en desarrollo de proyectos de Digestión Anaerobia considerando los diversos criterios específicos.

El costo estimado de acuerdo con la bibliografía para la inversión de un digester anaerobio de sistema húmedo, con una vida útil de 20 años y con capacidad de 50 toneladas de FORSU al día es de USD 3.156.785,00 y su costo anual de operación es de USD 157.839

El biometano obtenido del proceso de Digestión Anaerobia se estimó para ser empleada en el SITP para consumo en el sistema Transmilenio con lo que se reducirán los gastos de disposición de los FORSU y se emitirán bonos de carbono fácilmente comercializables además del digesto que puede ser comercializado o empleado en los procesos de recuperación del relleno.

En síntesis, los resultados de la evaluación económica indican que el proyecto es viable, de acuerdo con la etapa de prefactibilidad. Pues genera beneficios ambientales y sociales y significativos ahorros en los costos por tratamiento y disposición final de los RSU con el objetivo propuesto.

Se propone como tareas a desarrollar para llevar a cabo una propuesta de implementación de un proceso de tratamiento de la FORSU para la generación de biogás las siguientes actividades.

- Evaluación social de la implementación de una planta de producción de biogás de la FORSU de Bogotá.
- Estimar costos e indicadores de rentabilidad financiera y económica para una planta de mayor capacidad considerando la posibilidad de recolección selectiva de biomasa residual de la agroindustria en Bogotá y la sabana.
- Considerar la potencialidad de generación de biometano de la FORSU de Bogotá para inyectar al Sistema nacional de transporte (SNT) de Colombia y su evaluación financiera.

En diferentes instancias se están presentado convocatorias para la valoración energética de residuos sólidos urbanos lo cual se debe ver como una oportunidad para la aplicación de la metodología propuesta en este documento.

CAPITULO 10 BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (12 de 26 de 2008). *Secretaría Jurídica Distrital*. Obtenido de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=34262>
- Ayuntamiento de Madrid. (31 de Octubre de 2018). *Youtube*. Obtenido de Planta de Digestión Anaerobia de Las Dehesas: <https://www.youtube.com/watch?v=KIROhBL9P-Q>
- Biodisol . (Noviembre de 28 de 2016). *Digestión anaerobia. Proceso de producción de biogás*. Obtenido de Biodisol: <https://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/digestion-anaerobia-proceso-de-produccion-de-biogas-biocombustibles-energias-renovables/>
- Biogas Doña Juana. (2017). *Biogas.com*. Obtenido de <https://biogas.com.co/>
- Bogota UAESP. (24 de junio de 2021). *UAESP*. Obtenido de DOCUMENTO TÉCNICO DE SOPORTE: https://www.uaesp.gov.co/images/pgirs_mesas/DOCUMENTO%20TECNICO%20SOPORTE%20-%20DTS.pdf
- CEDIGAZ. (20 de 3 de 2019). *Global biomethane market: green gas goes global*. Obtenido de <https://www.cedigaz.org/global-biomethane-market-green-gas-goes-global/>
- CEUPE. (7 de 03 de 2021). *ceupe.com*. Obtenido de <https://www.ceupe.com/blog/condiciones-microorganismos-desarrollen.html>
- Circulo de Investigacion de Biogas y Biometano. (12 de junio de 2020). *Youtube*. Obtenido de Nuevas tecnologías en el sector energía y transporte: <https://www.youtube.com/watch?v=gxqAa5BKZtk>
- CONCEJO DE BOGOTA. (11 de Junio de 2020). *Bogota Gov Co*. Obtenido de Acuerdo 761 de 2020: <https://bogota.gov.co/sites/default/files/acuerdo-761-de-2020-pdd.pdf>
- Congreso de Colombia . (13 de 5 de 2014). *UPME*. Obtenido de http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf
- Congreso de Colombia. (13 de Mayo de 2014). *Congreso de la Republica*. Obtenido de Senado: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html
- CONGRESO DE COLOMBIA. (2021). *EL TIEMPO*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/uploads/files/2021/04/15/ac%20articulado%20consolidado%209pm%20-1-.pdf>
- CONSORCIO NCU- UAESP. (Marzo de 2018). *UAESP*. Obtenido de http://www.uaesp.gov.co/sites/default/files/Anexo%201.%20Resumen%20ejecutivo%20NCU_0.pdf
- CRA. (Agosto de 2020). *CRA*. Obtenido de <https://cra.gov.co/documents/AIN-Costos-Ambientales-Aseo-Documento-Final2.pdf>
- CREG 071. (21 de 03 de 2011). *CREG* . Obtenido de Apolo: [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/2b8fb06f012cc9c245256b7b00789b0c/216d73e5d623a9c40525785a007a6334/\\$FILE/Cr071-99.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/2b8fb06f012cc9c245256b7b00789b0c/216d73e5d623a9c40525785a007a6334/$FILE/Cr071-99.pdf)

- CREG. (Nov de 2016). *Apolo*. Obtenido de CREG:
<http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/dafe4d4fc83940e2052580bf005b67d0?OpenDocument>
- DNP . (21 de Noviembre de 2016). *CONPES* . Obtenido de Colaboracion :
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>
- DNP. (21 de Nov de 2016). *Colaboracion DNP*. Obtenido de CONPES:
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>
- DNP. (Julio de 2019). *DNP*. Obtenido de Colaboracion:
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/BasesPND2018-2022n.pdf>
- EAAB. (21 de 2 de 2021). *Acueducto.com.co*. Obtenido de BIOGAS:
https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/ambiente/saneamiento/rio-bogota/ptar-salitre/productos-de-la-ptar-salitre/biogas!/ut/p/z0/fYy9CslwFEZfJUvmpBWL_a_EPFJSCQpul3NRQomlum9yKj290c3E85zt8QolaKA9P2wNZ9OASN6poi2ots5XMT_ttuZfVubscr1m1yM9LcRDqf5Ae7H2
- European Commission Project: Solid Waste Analysis-Tool . (Mayo de 2004). *wien.gv.at*. Obtenido de <https://www.wien.gv.at/meu/fdb/pdf/swa-tool-759-ma48.pdf>
- FAO . (2011). *Manual de Biogas*. Obtenido de FAO: <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- FAO. (2019). *Probiomasa*. Obtenido de Guia de Biogas y Biodigestores:
http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf
- Fernández Barberis, G., & alt, e. (2013). Aplicación del VISUAL PROMETHEE : planteamiento y resolución de un problema real de Decisión Multicriterio. *Anales de ASEPUMA nº 21: 413*,
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4749042>.
- GAIA. (201). Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4749042>
- GHG Protocol. (2014). *Global Warming Potential Values*. Obtenido de https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf
- GIZ. (2010). *Biogasportal.info*. Obtenido de <https://mediathek.fnr.de>:
<https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/l/e/leitfadenbiogas-es-2013.pdf>
- GIZ. (2015). *GIZ*. Obtenido de <https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-catalogo.pdf>
- Gonzalez , G. I., Rustrián, E., Houbron, E., & Zamora, A. (2008). Impacto de la tasa de humedad en la biodegradación de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Veracruz, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 336-341.
- Grisales Rangel, S., & Arellano Ramírez, G. (2017). <http://bibliotecadigital.usbcali.edu.co/>. Obtenido de http://bibliotecadigital.usbcali.edu.co/bitstream/10819/6131/1/An%C3%A1lisis%20comparativo%20sobre%20las%20tecnolog%C3%ADa_Stephanie%20Grisales%20R_2017.pdf

- HIDALGO, D. (15 de Mayo de 2019). *CYTED*. Obtenido de http://cyted.org/sites/default/files/produccion_de_biometano_cartif.pdf
- ICONTEC. (10 de 12 de 2001). *Normas de calidad*. Obtenido de NTC 4826: <https://www.icontec.org/rules/calidad-del-gas-natural-comprimido-para-uso-vehicular/>
- IDAE. (2007). *Título 5: Digestores anaerobios - IDAE*. Obtenido de https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf
- IDEAM PNUD MADS DNP CANCELLERIA. (2015). *IDEAM*. Obtenido de TERCERA COMUNICACION NACIONAL.
- IEA. (3 de 2020). *IEA*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>
- Instituto Mexicano del Petroleo . (30 de Noviembre de 2018). *Gobierno de Mexico*. Obtenido de SENER: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/329908/Reporte_Inteligencia_Tecnologica_BIOGAS_Final.pdf
- LINDE-KCA-DRESDEN GMBH. (2003). *REMBIO MEX*. Obtenido de LINDE: http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2015/01/Hagenmeyer2003_DigestionAnaerobiaSecaYHumeda.pdf
- MADS . (24 de junio de 2021). *Youtube*. Obtenido de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Colombia: https://www.youtube.com/watch?v=PwJOI_14Ruw
- MADS. (1 de Agosto de 2018). *MEDIDAS PRIORIZADAS PARA LA CONTRIBUCIÓN NACIONALMENTE DETERMINADA DE COLOMBIA EN MITIGACIÓN DE GEI*. Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/images/Medidas_NDC_25_agosto-1_Version_Comunicaciones_2.pdf
- MADS. (26 de Nov de 2020). *Minambiente*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/4877-colombia-reducira-en-un-51-sus-emisiones-de-gases-efecto-invernadero-para-el-ano-2030>
- MARTÍNEZ GARCÍA, C. (Septiembre de 2014). *Repositorio de Tesis DGBSDI TESIUNAM Tesis de maestría*. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6975/tesis.pdf?sequence=1>
- MHCP . (1 de junio de 2017). *Presidencia* . Obtenido de <http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%20926%20DEL%2001%20DE%20JUNIO%20DE%202017.pdf>
- MITECO . (2019). *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico*. Obtenido de Sistemas de tratamiento: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Tratamientos-biologicos-biometanizacion.aspx>

- Montes Carmona, M. E. (2008). *Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás*. Madrid : Archivo digital UPM.
- Omar, V. A. (2014). *Repositorio UNAM*. Obtenido de UNAM:
https://repositorio.unam.mx/contenidos/ficha/bases-biotecnologicas-y-analisis-de-tecnologias-de-la-digestion-anaerobia-para-el-tratamiento-de-los-residuos-solido-314481?c=Qpzp5W&d=false&q=*&i=2&v=1&t=search_0&as=1
- Palau Estevan, Carmen Virginia . (1 de 3 de 2021). *RIUNET*. Obtenido de
<https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68331/Palau%20-%20Digesti%C3%B3n%20anaerobia%20de%20residuos%20de%20biomasa%20para%20la%20producci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s.%20Fundamentos..pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Presidencia de la Republica. (24 de 01 de 2020). *MinAmbiente presentó estrategia de Economía Circular de Colombia en Davos*. Obtenido de
<https://id.presidencia.gov.co/Paginas/prensa/2020/MinAmbiente-presento-estrategia-de-Economia-Circular-de-Colombia-en-Davos-Suiza-200124.aspx>
- PROMETHEE-GAIA . (13 de 04 de 2021). *PROMETHEE-GAIA software*. Obtenido de PROMETHEE-METHODS: <http://www.promethee-gaia.net/index.html>
- RESIDUOS PROFESIONAL. (2 de Octubre de 2015). RESIDUOS PROFESIONAL. Obtenido de
<https://www.residuosprofesional.com/residuos-de-alimentos-biogas-transporte/>
- Rivas Solano, O., & et alt. (2011). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología en Marcha*,, 39-46. Obtenido de UniRioja.
- Rodriguez, D. (17 de Abril de 2021). Información básica Trasmilenios Fase V. (H. H. Herrera, Entrevistador)
- SEMARNAT, SENER y la GIZ. (2018). *Estudio de digestión anaeróbica seca y húmeda en planta piloto, para determinar el potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos generados en el municipio de Naucalpan de Juárez*. Mexico : GIZ.
- SENADO . (13 de Mayo de 2014). *Secretaria del Senado*. Obtenido de
http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html
- Senado . (24 de junio de 2021). *Proyectos de Ley Radicados 2020 - 2021*. Obtenido de Leyes Senado: <http://leyes.senado.gov.co/proyectos/index.php/textos-radicados-senado/p-ley-2020-2021/2128-proyecto-de-ley-365-de-2020>
- SITP. (13 de 08 de 2020). *Trasmilenio*. Obtenido de
https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/29-12-2019/48._anexo_4_acta_comite_31_mayo_2019.pdf
- SSPD. (DICIEMBRE de 2018). *Superservicios*. Obtenido de
https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2._disposicion_final_de_residuos_solidos_-_informe_2017.pdf

- Thieme , E. [. (31 de 03 de 2015). *PROBIOGAS*. Obtenido de <https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-catalogo.pdf>
- Thieme Elisa, [. a. (2015). *CATÁLOGO DE TECNOLOGIAS E EMPRESAS DE BIOGÁS*. Obtenido de GZ.DE: <https://www.giz.de/en/downloads/probiogas-catalogo.pdf>
- TRASMILENIO. (29 de Septiembre de 2019). *TRASMILENIO*. Obtenido de Publicaciones: <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/151446/transmilenio-avanza-en-la-renovacion-del-sistema-con-846-buses-nuevos/>
- Trasmilenio. (31 de Julio de 2020). *Abecé licitación etapa 3 de la Fase V*. Obtenido de Transmilenio: <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/151834/abece-licitacion-etapa-3-de-la-fase-v/>
- UAESP. (28 de Agosto de 2020). *UAESP*. Obtenido de <http://www.uaesp.gov.co/sites/default/files/documentos/AVANCES%20DEL%20ACUERDO%20344%20DE%202008.pdf?width=800&height=800&iframe=true>
- UAESP. (29 de 02 de 2012). *UAESP*. Obtenido de http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/documentos/caracterizacion/residenciales_02-29-2012.pdf
- UAESP. (17 de 4 de 2021). *Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos* . Obtenido de <http://www.uaesp.gov.co/>
- UIS UPME IDEAM . (2011). *CD UPME*. Obtenido de Biblioteca UPME: <http://bdigital.upme.gov.co/handle/001/1058>
- UN TECSOL. (Febrero de 2018). *Centro de documentacion* . Obtenido de UPME: <https://bdigital.upme.gov.co/jspui/bitstream/001/1317/1/Informe%20final.pdf>
- UN_TECOL. (2 de 2018). *UPME*. Obtenido de <https://bdigital.upme.gov.co/jspui/bitstream/001/1317/1/Informe%20final.pdf>
- UNAM Departamento de Ingeniería Química. (Septiembre de 2018). *GIZ México*. Obtenido de https://www.giz.de/de/downloads/ENRES%20Estudio_determinar_potencial_produccion_bio_gas_env_2.pdf
- UPME. (24 de 2 de 2021). *Incentivos* . Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/Incentivos/Paginas/abcfnce.aspx#googtrans/gl/en>
- UPME. (24 de 02 de 2021). *Incentivos* . Obtenido de Upme: <https://www1.upme.gov.co/Normatividad/203-2020.pdf>
- UPME. (25 de 2 de 2021). *Valoracion Energetica de Residuos*. Obtenido de Aplicativos: <http://www.upme.gov.co/ValoracionEnergeticaRSU/>
- VANTI. (27 de 04 de 2021). *Grupo Vanti*. Obtenido de <https://www.grupovanti.com/gas-natural-vehicular-gnv/precio-historico-del-gas-natural-vehicular/>

ANEXO 1 Escenario Promethee

Escenario1	Biogas	Biometano	Consumo En...	Residencia	Temperatura	Solidos	Digestor	Pretratamiento	Biometano	Digestato	Costo de inv...	Costos de O...	
Unidad	Nm3/Ton	Nm3/Ton	kwh/Ton	dias	°C	%	5-point	5-point	NA	5-point	U\$/Ton	U\$D año/Ton	
Cluster/Grupo	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	
Preferencias													
Estadísticas													
Mínimo	90,00	0,00	10,00	15,00	37,00	8,00	3,00	2,00	0,00	2,00	\$ 488,00	\$ 73,00	
Máximo	120,00	72,00	120,00	25,00	55,00	10,00	4,00	3,00	1,00	5,00	\$ 610,00	\$ 92,00	
Media	106,25	49,50	40,50	19,50	41,75	9,50	3,50	2,50	0,75	3,25	\$ 543,00	\$ 81,25	
Desv. est.	11,92	28,81	46,05	3,84	7,66	0,87	0,50	0,50	0,43	1,09	\$ 47,00	\$ 7,15	
Evaluaciones													
BTA	■	90,00	0,00	20,00	15,00	37,00	10,00	bueno	malo	No	mediano	\$ 610,00	\$ 92,00
WELTEC	■	120,00	72,00	10,00	17,00	55,00	10,00	mediano	malo	Si	malo	\$ 488,00	\$ 73,00
BRV	■	115,00	63,00	12,00	25,00	38,00	8,00	bueno	mediano	Si	muy bueno	\$ 562,00	\$ 83,00
GICON	■	100,00	63,00	120,00	21,00	37,00	10,00	mediano	mediano	Si	mediano	\$ 512,00	\$ 77,00

