Eje **II**

Acciones proambientales en el contexto social

Capítulo **II.1**

Aprovechamiento energético y material de la fracción orgánica de residuos sólidos municipales a través de procesos bio-óxido-reductivos aerobios y anaerobios

Nora Restrepo Sánchez [1]
Liliana Acevedo[3]
Miguel Acevedo[3]
Diego Londoño[3]
Alejandro Hurtado [3]
Amilvia Ortiz[3]
Alejandro Ruiz[3]
Joe Sánchez[3]
Juan F. Sierra De La Rosa[3]
Carlos Uribe[3]
Yony Zapata[3]
Carlos Peláez Jaramillo[3]

https://doi.org/10.61728/AE20251864

[1] Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares (GIEM), Instituto de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. E-mail: neugenia.restrepo@udea.edu.co

1. Introducción capitular

La gestión de los residuos sólidos urbanos se ha trabajado históricamente como una serie de estrategias para solucionar una problemática de salud pública. Esta visión ha venido cambiando en las últimas décadas y hoy en día la percepción de los residuos se acerca más a la de un recurso con potencial de ser utilizado en diferentes procesos productivos. La biodigestión anaerobia a partir de residuos ha sido desarrollada y adoptada para la estabilización principalmente de estiércoles y aguas residuales industriales, concebida como sistema de tratamiento para vertimiento. Sin embargo, en los últimos años, este proceso ha sido incorporado al concepto de biorrefinería, capitalizando el biogás producido como fuente energética, y articulándolo con el aprovechamiento material para la producción de fertilizantes. El reciclaje de residuos orgánicos contribuye a conservar la concentración de nutrientes en el suelo, mejorando su fertilidad, y ayudando a disminuir la dependencia de fertilizantes de síntesis convencionales sin comprometer el rendimiento de los cultivos (Ram et al., 2021; Zielińska y Bułkowska, 2024).

En 2020, Colombia dispuso 32 580.96 toneladas diarias de residuos sólidos como parte del servicio público de aseo. El 45.23 % de estas toneladas provino de las 8 ciudades más pobladas. Para el departamento de Antioquia se reportaron 4 421.48 ton/día dispuestas en los diferentes rellenos sanitarios autorizados del departamento, y más del 50 % son residuos orgánicos (Duque Márquez et al., 2021). Desde el entendimiento de la biomasa residual como sustancia con un contenido importante de energía almacenada en los enlaces químicos, el GIEM hace dos décadas incursionó en el estudio de la digestión anaerobia de diferentes tipos de sustratos, buscando diversificar las alternativas de solución para la industria agropecuaria del país.

Particularmente con la fracción orgánica putrescible de los residuos sólidos municipales o urbanos (FORSU), se han desarrollado múltiples

montajes de laboratorio, orientados a determinar el potencial de aprovechamiento material de este sustrato, así como su valorización energética. De igual manera, se han implementado sistemas de digestión anaerobia por etapas en procesos seco-húmedo y a escala tanto piloto como productiva para el aprovechamiento de FORSU en varios territorios del departamento de Antioquia. En los municipios de Támesis, Caramanta, Peñol y Carmen de Viboral, se establecieron sistemas para aprovechamiento del componente orgánico de los residuos sólidos municipales separados en fuente, siendo el sistema de Támesis el de mayor escala con capacidad de procesar hasta 60 ton/mes, que permite además un crecimiento modular que duplicaría su capacidad.

Para implementar este esquema de economía circular en el territorio colombiano, es indispensable disponer de residuos separados en la fuente. En Colombia los parámetros de referencia para los coproductos derivados de cualquier tipo de tratamiento de los residuos orgánicos aprovechables a escala industrial en agricultura, tienen que cumplir con la normativa aplicada por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). El ICA a través de su Resolución 00150 de 2003 orienta la comercialización, uso y manejo adecuados de fertilizantes y acondicionadores de suelos. Así mismo el ICA acoge la Norma Técnica Colombiana (ICONTEC, 2011) que establece los requisitos específicos con los que deberán cumplir estos productos obtenidos desde diferentes tipos de materiales, entre ellos, la estabilización de residuos sólidos urbanos, los cuales deberán ser separados en la fuente.

Más allá del cumplimiento de la norma, la separación en fuente minimiza la migración de elementos contaminantes al prevenir su lixiviación cuando están en contacto con la materia orgánica en descomposición. En particular se previene la migración de metales pesados (obtenidos por procesos extractivos) desde las minas hacia los suelos. Una buena separación en fuente, incentiva a su vez el aprovechamiento del componente no putrescible de los residuos sólidos urbanos (RSU), favoreciendo la puesta en marcha de estrategias para la minería de residuos (Tai et al., 2011; Ferronato y Torretta, 2019).

La tecnología que el GIEM viene implementando para el aprovechamiento de FORSU, se basa en sistemas hetero fase que involucran múltiples operaciones unitarias en las diferentes etapas; la primera consiste en una fermentación en estado sólido, en la que se mantiene una humedad

del 80 %, para favorecer la consolidación de la microbiota autóctona, y optimizar la obtención de ácidos orgánicos de bajo peso molecular. La humedad de la materia orgánica se mantiene por recirculación del lixiviado, que a su vez incrementa la extracción de la fracción orgánica soluble.

2. Desarrollo

El Grupo GIEM, adscrito a la facultad de ciencias exactas y naturales de la Universidad de Antioquia ha trabajado durante más de tres décadas, en la comprensión de los procesos de transformación-estabilización de la biomasa residual.

2.1. Evaluación impacto separación en fuente-compostaje

En este contexto, entre los años 2000 y 2003, el GIEM incursiona en el reconocimiento de los residuos sólidos orgánicos municipales. Para ese momento, se dio el proceso de clausura del relleno sanitario Curva de Rodas, el cual operó durante dos décadas, con una cobertura de 62 hectáreas en la cuenca de la quebrada Rodas correspondiente a los municipios de Copacabana y Bello, Antioquia, Colombia. Durante su vida útil, en este relleno se dispusieron residuos sólidos en una cantidad superior a 7.500.000 toneladas, provenientes de más de 25 municipios (Yepes-García y Villarraga-Herrera, 2018; Posada y Colombia, 2019).

Desde aquel momento se identificaba la necesidad de disminuir el ingreso de residuos al nuevo relleno Parque Ambiental La Pradera. Frente a dicha intención, se tuvieron sobre la mesa ofertas de empresas que ofrecían tecnologías europeas para obtener compost a partir de residuos no separados en fuente, utilizando herramientas de separación en planta. Entendiendo la influencia que la materia orgánica en descomposición tiene sobre las dinámicas de solubilización y procesos de óxido-reducción de los metales pesados, se generó una alerta sobre la aplicación en suelos de compost provenientes de residuos no separados en fuente y sus posibles implicaciones agro-ambientales.

Se realizó un estudio comparativo de tratamiento aeróbico mecánico-oxidativo con residuos separados y sin separación en fuente, en el cual, además

de la cuantificación de algunos metales, se hizo un seguimiento cinético semanal en el que se evaluaron: Humedad, nitrógeno, cenizas, fósforo, carbono orgánico, pH, conductividad, densidad y microelementos, con el fin de establecer el tiempo de estabilización. Se tuvieron procesos de estabilización con tiempo de residencia de aproximadamente ocho semanas. En el transcurso del proceso se realizó un control de las principales variables por medio de toma de muestra representativa en cada semana y se realizó el análisis respectivo, manteniendo adecuada humedad y aireación.

2.2. Sistemas de aprovechamiento energético y material

Reconociendo la importancia de avanzar en la investigación y desarrollo del manejo y valorización de residuos sólidos urbanos, la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Antioquia estableció cuatro convenios con la Universidad de Antioquia, específicamente con el GIEM. El objetivo de estos convenios fue implementar sistemas de aprovechamiento energético y material basados en digestión anaerobia acoplada a estabilización aerobia. En los municipios de Támesis, Caramanta, Peñol y Carmen de Viboral, se desarrollaron e implementaron sistemas para el aprovechamiento de la biomasa residual presente en los residuos sólidos urbanos separados en la fuente. La selección de los municipios se hizo en cada momento, contando con la existencia de rutas selectivas de recolección de residuos y con avances en la cultura ciudadana de separación en fuente.

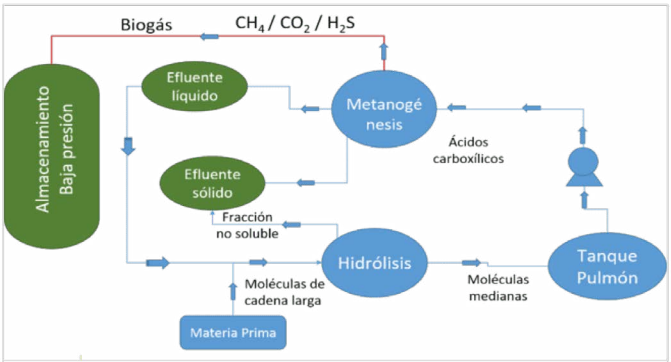
En estos proyectos se amplía el concepto de aprovechamiento de la fracción orgánica, a una estrategia de aprovechamiento tanto material como energético. El trabajo de compostaje se extendió, implementado un sistema combinado de biodigestión anaerobia para producción de biogás, y estabilización aerobia de las fracciones sólida y líquida. En este esquema se abarca tanto la generación de biogás, como la producción de enmiendas tanto líquidas como sólidas. En algunos casos, también se produjeron fertilizantes mineral-orgánicos específicos para los suelos de la región. El diseño conceptual para esta forma de aprovechamiento de FORSU comprende un sistema hetero-fase (en dos fases sólida-líquida) en cuatro etapas.

En primera instancia se realiza molienda para aumentar la eficiencia de las etapas siguientes, al adecuar el tamaño de partícula. En la segunda eta-

pa se da la hidrólisis y la acidogénesis en los reactores de percolación-hidrólisis, generando un percolado enriquecido en materia orgánica soluble que es llevado por bombeo a los reactores metanogénicos de la siguiente fase (Figura 1). Este esquema de establecer en reactores separados las reacciones de solubilización-hidrólisis-acidogénesis y las transformaciones metanogénicas mejora la eficiencia en la generación de biogás, ya que se previene la acidificación del reactor metanogénico (Tsegaye et al., 2023).

Figura 1

Diseño Conceptual General – Sistemas de Aprovechamiento Energético y Material FORSU



Fuente: Elaboración propia.

En los reactores de percolación-hidrólisis permanece una fracción sólida que es humedecida por recirculación del efluente líquido, para obtener la mayor cantidad de nutrientes en el percolado. El digestato sólido remanente, una vez finalizada la generación de percolado, se descarga por paleado, y es llevado a compostaje para su estabilización aerobia final. El percolado pasa a una tercera fase en un reactor anaerobio metanogénico, donde se obtiene biogás y una fracción líquida con materia orgánica estabilizada. A este efluente líquido se le denomina biol, y constituye una enmienda líquida para suelos o la materia prima de fertilizantes órgano-minerales líquidos.

Este diseño conceptual se fundamenta en la separación de los procesos de hidrólisis-acidogénesis y metanogénesis. En la etapa inicial, se da la hidrólisis de macromoléculas como lípidos, proteínas y polisacáridos, promovida por enzimas extracelulares, generando estructuras moleculares

más simples como péptidos, aminoácidos, monosacáridos , disacáridos y ácidos grasos que pueden ser directamente empleados por los microorganismos como fuente de materia y energía (Sánchez Marín, 2019). En la acidogénesis subsiguiente se producen ácidos orgánicos de bajo peso molecular, que constituyen parte de la fracción orgánica soluble que pasa a la fase de metanogénesis en un reactor separado. El pH óptimo de la hidrólisis está alrededor de 5.5-6.0, en tanto la etapa metanogénica se acerca a la neutralidad (Dhull et al., 2023).

Esta separación de etapas mejora el rendimiento, ya que permite optimizar el proceso de solubilización-hidrólisis-acidogénesis de una matriz sólida como la FORSU. A su vez, se logra estabilizar el pH del efluente líquido (percolado) antes de pasar a la etapa metanogénica, evitando la inhibición de la microbiota en el segundo reactor. En esencia, esta separación en fases permite que cada concierto de microorganismos se adapte a su propio sustrato.

2.3. Planta Piloto Carmen de Viboral

A través del convenio 2013-S.S.-1800.29, se desarrolló un sistema a escala piloto, el cual se implementó en las instalaciones del relleno sanitario La Cimarrona. La planta piloto constó de un molino de residuos en húmedo y seis reactores correspondientes a dos líneas de trabajo. Cada línea cuenta con un reactor de hidrólisis, lecho de lodos y filtro anaerobio. Las dos líneas alimentan al final un isotanque para el almacenamiento de efluente producido luego de la digestión anaerobia. Así mismo, el biogás producido en las dos líneas se almacena en una geomembrana cilíndrica de polivinilo de cloruro.

2.4. Plantas Támesis Escala Productiva

En el municipio de Támesis (Antioquia, Colombia) se implementó otra planta piloto con capacidad de 1000 kg/bache de FORSU, en el mismo esquema de la planta descrita para el Carmen de Viboral. En un segundo convenio (código 4600009841) enfocado en el municipio de Támesis, se desarrolló una planta a escala productiva, que mantiene el diseño con-

ceptual ya mencionado, y evoluciona en la etapa metanogénica a un reactor anaerobio de flujo ascendente. Estos reactores son conocidos como UASB, por su sigla en inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket. Este nuevo sistema fue establecido en el terreno del relleno sanitario del municipio, donde ya se tiene definido el acopio de residuos provenientes de rutas de recolección selectiva.

2.5. Planta Morro Moravia

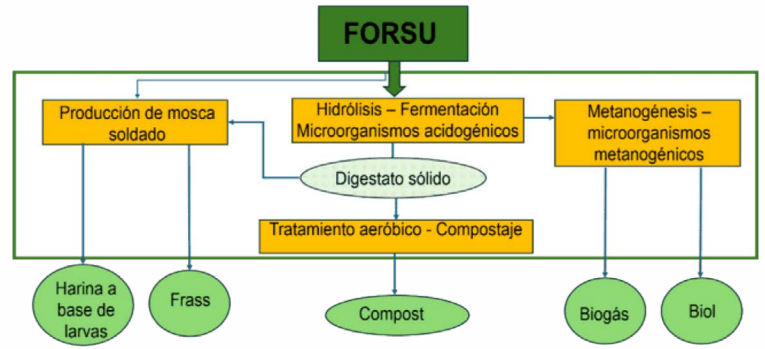
Otro programa de investigación llevado a cabo por el GIEM en torno a FORSU se desarrolló en el Morro Moravia, localizado en el sector centro-oriental de Medellín. Este morro empezó a ser utilizado a inicios de los años 70 como un botadero a cielo abierto de escombros y residuos, y entre 1977 y 1984 funcionó formalmente con el relleno sanitario de la ciudad. En el sector se tuvo un proceso de invasión como asentamiento humano en viviendas, sobre lo que es considerado un sustrato antropogénico que no podría ser considerado como suelo. Las actividades del GIEM en el Morro se implementaron por alrededor de una década (2012-2022) en el marco del programa de la alcaldía de Medellín "Habilitación Ambiental del morro Moravia". Este morro antropogénico de 35 metros de altura contiene 1.5 millones de toneladas de desechos, lo que hace que este lugar sea de particular interés, dado que no cumple con las exigencias de estabilidad y seguridad necesarias para permitir el fenómeno de asentamiento humano que allí se dio. Con el fin de aportar criterios para la evaluación del riesgo, se realizó la evaluación del contenido de metales pesados en el terreno, además de otros potenciales contaminantes.

Hacia el año 2012, se establecieron protocolos para hacer seguimiento y mitigación de los procesos de autocombustión al interior de la masa de residuos. Para ello se instalaron sondas de muestreo, haciendo seguimiento semanal a los niveles de producción de biogás y temperatura. En los puntos críticos, se implementaron barreras físicas de aislamiento de la zona de combustión, para prevenir el intercambio de gases, en especial el ingreso del comburente oxígeno (Dávila, 2024). En paralelo, y dado que se tenía presencia permanente en el sitio, se estableció en la cima del morro un programa de compostaje en pilas con residuos orgánicos generados por pequeños mercados del sector.

2.6. Biorrefinería FORSU: energía-compost-acuaponía

Avanzando en la consolidación de estrategias de valorización de FORSU, se integró la producción de energía y compost a un esquema de biorrefinería a partir de residuos sólidos urbanos, articulando la producción de alimento (Figura 2). Dando continuidad al trabajo descrito en el ítem 2.3.1, el sistema se extendió articulando a un módulo de hidroponía. Como ya se mencionó, en el esquema original, el digestato sólido húmedo es terminado de estabilizar en condiciones aerobias para generar compost. Ese mismo digestato se puede utilizar de manera alterna para alimentar larvas de mosca soldado (Hermetia illucens), las cuales hacen la bioconversión a frass, otro coproducto de valor como fertilizante (Sierra de la Rosa et al., 2024).

Figura 2
Esquema de Coproductos de Biorrefinería de FORSU



Fuente: Elaboración propia.

La FORSU también puede llevarse directamente al cultivo de larvas de mosca soldado al inicio del proceso, favoreciendo la ruta de obtención de una fuente alternativa de proteína. Las larvas, en la fase de prepupas, una vez procesadas en harina, son utilizadas para la alimentación de peces. El ciclo continúa con un sistema acuapónico, en el que el amonio eliminado por los peces es pasado por un filtro de bacterias nitrificantes. El agua enriquecida en nitrato y suplementada con hierro es conducida como fertilizante líquido a unidades de cultivo hidropónico. El agua de las unidades hidropónicas, ya sin nutrientes, se recolecta en un tanque reservorio, luego

se bombea de nuevo a los tanques de peces y se repite el ciclo. Los productos de desecho del sistema acuapónico, tales como sedimentos y residuos de cosecha de peces y plantas, son retornados a los procesos de biodigestión y de cultivo de insectos, completando así el esquema de biorrefinería de FORSU (Sierra de la Rosa et al., 2024).

El sistema implementado en el morro de Moravia incluye cuatro tanques de peces (1000 l c/u), dos sedimentadores cónicos (500 l c/u), dos mineralizadores aerobios de 250 l c/u, un biofiltro (100 l), cuatro unidades de cultivo hidropónico en sustrato (1 m2 c/u), un módulo de cultivo hidropónico en película delgada en tubos de PVC y un tanque reservorio (1000 l) para el agua de las plantas que se recircula a los tanques de peces. El módulo de acuaponía tenía capacidad para producir hasta 480 peces, y 300 plántulas de hortalizas. Como especie a utilizar se seleccionó tilapia negra (Oreochromis niloticus). Se evaluó el efecto de la densidad de siembra de alevinos sobre el crecimiento y supervivencia de los peces, realizando siembras a baja y media densidad (65 y 130 peces/tanque, respectivamente). En un segundo ensayo, se realizó siembra a densidad de 150 peces/tanque. Se hizo seguimiento de variables fisicoquímicas de calidad de agua en los tanques y el biofiltro. Se registró la concentración de oxígeno disuelto, así como las diferentes especies de nitrógeno evaluando amoniaco, nitritos y nitratos (Sierra de la Rosa et al., 2024). El componente hidropónico se desarrolló con plantas de alto porte (zucchini, tomate cherry, calabaza, berenjena) para el cultivo en sustrato. En el sistema de película delgada se sembró lechuga y albahaca. Las plántulas se sembraron, 40 días después de sembrados los dos últimos tanques de peces, una vez alcanzada la maduración del biofiltro con la transformación de amonio a nitrato.

3. Resultados

3.1. Evaluación impacto separación en fuente-compostaje

La Tabla 1 presenta la relación entre el producto obtenido a partir de residuos sin separación en fuente y residuos separados en fuente (ssf/sf), para las variables de interés. Se calculó además el incremento o disminución comparativa para cada variable, tomando como el valor del 100 % aquel

correspondiente al material con separación en fuente. Como puede verse, los resultados muestran claramente el efecto negativo de la no separación en fuente. Se presenta un detrimento en las variables positivas tales como carbono orgánico, nitrógeno y capacidad de retención de agua. A su vez, se incrementa la concentración de metales pesados totales por un factor de 10, como es de esperarse por los procesos extractivos que la materia orgánica soluble, particularmente ácidos orgánicos de bajo peso molecular, ejercen al estar en contacto con los elementos metálicos presentes en los residuos no separados en fuente.

Tabla 1

Comparativo Producto Estabilizado proveniente de Residuos Orgánicos Separados y Sin Separación en Fuente

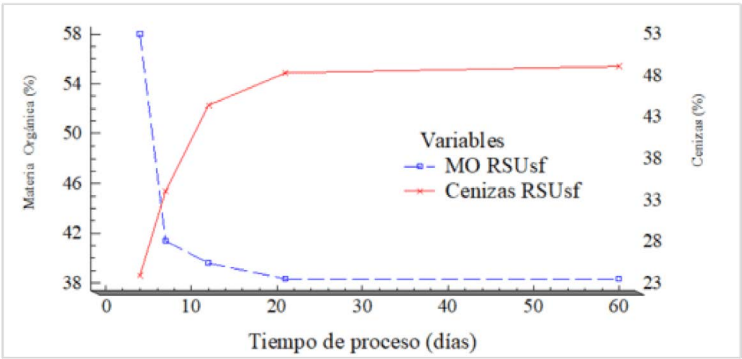
	Separados en Fuente (sf)	**Sin Separación en Fuente (ssf)**	**ssf/sf**	**Incremento o disminución**
Carbono orgánico CO (%)	32.6	21.9	0.672	-32.8
Nitrógeno (%)	2.79	2.21	0.792	-20.8
Fósforo (%)	1.44	0.923	0.641	-35.9
Potasio (%)	1.8	1.55	0.861	-13.9
Sodio (%)	0.33	0.91	2.758	175.8
Magnesio (%)	0.85	1.16	1.365	36.5
Zinc (%)	0.17	0.28	1.647	64.7
Cenizas (%)	13.2	36.1	2.735	173.5
Capacidad de intercambio catiónico CIC (meq/100 g)	71.2	25	0.351	-64.9
Humedad (%)	37.4	21.5	0.575	-42.5
pH	8.34	8.19	0.982	-1.8
Conductividad (dS/m)	1100	1491	1.355	35.5
Cromo (ppm)	0.05	45.2	904.0	90300
Cadmio (ppm)	3.4	5.03	1.479	47.9
Plomo (ppm)	28.6	239.5	8.374	737.4
Níquel (ppm)	0.01	26.5	2650.0	264900
Aluminio (ppm)	0.72	1.26	1.750	75
Suma Metales (ppm)	32.78	317.49	9.685	868.5

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la cinética de estabilización de la materia orgánica, en la Figura 3 se muestran los resultados para el contenido de materia orgánica (MO) y las cenizas en el ensayo realizado con residuos separados en fuente (RSUsf).

Figura 3

Cinética de evolución de la biomasa residual en compostaje

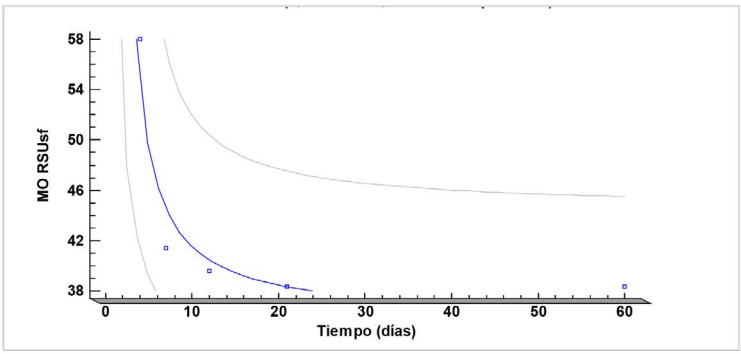


Nota: MO RSUsf = 1 / (0,0279262 - 0,0384161 / días proceso RSUsf).
Fuente: elaboración propia

Con base en este resultado, se implementó un modelo de regresión para la relación univariada de materia orgánica y tiempo de proceso. La Figura 4 presenta el modelo ajustado, el cual arrojó la siguiente ecuación.

Figura 4.

Modelo de regresión ajustado relación univariada materia orgánica - tiempo de proceso de estabilización aerobia para FORSUsf.



Fuente: elaboración propia

Como se aprecia en la Figura 4, en un tiempo de residencia de 22 días, se estabiliza la pérdida de materia orgánica, después de lo cual el material sigue sufriendo una transformación bioquímica hasta llegar a un material maduro.

3.2. Sistemas de aprovechamiento energético y material de FORSU

En la Tabla 2 se resumen los parámetros de diseño de los diferentes sistemas que se han trabajado. En la primera parte se encuentran las características de los reactores de percolación-hidrólisis, y en la parte final los parámetros del reactor metanogénico principal (UT FORSU Medellín, 2023).

Tabla 2
Parámetros de diseño

Etapa Percolación-Hidrólisis					
Ítem	**Unidad**	**Moravia**	**El Peñol**	**Caramanta**	**Támesis**
Geometría		Cúbico	Cilíndrico	Cilíndrico	Cilíndrico
Diámetro	m		1.25	0.981	3.5
Radio	m		0.625	0.491	1.75
Altura total	m	1	1.75	2.957	1.5
Área soporte	m^2	1	1.227	0.756	9.621
Volumen útil	m^3	1	1.718	1.788	11.545
Máxima presión sobre la masa	ton/m^2	0.39	0.77	1.301	0.66
Tiempo de retención de sólidos máximo	días	14	20	20	12
Etapa Metanogénica					
Diámetro	m	1.3	0.863	0.83	2.4
Radio	m	0.65	0.432	0.415	1.2
Altura total	m	2	1.725	2.39	8.5
Área soporte	m2	1.327	0.585	0.541	4.524
Volumen trabajo	m3	2.538	0.807	1.035	30.762
Reactores	#	2	2	2	2

Máxima presión hidrostática	psi	27.81	20.35	27.81	96.36
Tiempo retención hidráulico	días	25	8	9.4	12
Demanda química de oxígeno	kg O_2 /m^3	91.1	140	47.72	58.5
Tasa de carga orgánica	kg DQO / (m^3*d)	3.64	17.50	5.07	4.88

Fuente: Elaboración propia.
Nota: ton/m2: tonelada/metro cuadrado, psi: pounds per square inch

3.3. Planta Piloto Carmen de Viboral

Las cargas totales del sistema inicialmente se concibieron para tratar 500 kg en cada reactor de hidrólisis, pero observaciones realizadas en un primer bache evidenciaron una reducción importante de la altura de la columna de material orgánico. Lo anterior permitió aumentar la cantidad máxima de carga en cada reactor de percolación-hidrólisis hasta 715 kg. Durante la fase de estabilización del sistema se ajustó la operación, principalmente con base en la recirculación de efluente hacia la línea de hidrólisis. Una recirculación del 50 % del efluente permitió mantener valores de relación ácidos grasos volátiles/alcalinidad (AGV/ALK) menores a 0.6. En condiciones estables del sistema, se calculó una tasa de producción de biogás entre 0.8 y 1.2 m^3 biogás/día. Según los registros de biogás producido y la carga al inicio del proceso, se calculó un rendimiento entre 100 y 130 de biogás generado por cada kg de material orgánico alimentado. La composición del biogás fluctuó en el contenido de metano entre 54 y 60 %.

3.4. Planta Támesis Escala Productiva

El diseño de la planta comprende dos reactores de percolación-hidrólisis, con capacidad para procesar 60 ton/mes de FORSU. El sistema ha operado con alimentación de cerca de 2 toneladas/día, con tiempos de retención de sólidos de 12 días en esta etapa de percolación. El producto sólido estabilizado (compost) es entregado a cultivadores de la región como abono.

La etapa metanogénica quedó implementada con capacidad para procesar el percolado obtenido de hasta 120 ton/mes de FORSU. El diseño modular de la planta permite que esta máxima capacidad del reactor metanogénico se alcance si se adicionan dos reactores más de percolación-hidrólisis. El reactor metanogénico de segunda generación UASB tiene un volumen útil de trabajo de 30 m^3, que recibe por bombeo el percolado almacenado en el tanque pulmón. El bombeo es programable y se ajusta de acuerdo con las condiciones encontradas en el percolado y de acuerdo con el monitoreo del reactor metanogénico para garantizar su correcto funcionamiento.

En la Figura 5 se presenta una foto del reactor metanogénico primario, en donde se puede apreciar la geometría de este reactor UASB, que, junto con el diseño interior, facilita la separación de las fases sólida (lodos), líquida (biol) y gaseosa (biogás).

Figura 5
Reactor metanogénico primario – Támesis, Antioquia, Colombia

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Planta Morro Moravia

El sistema se consolidó con el procesamiento de alrededor de 500 kg/día de FORSU en el ingreso al tanque de percolación-hidrólisis (Sánchez Marín, 2019). El digestato generado se terminaba de estabilizar de manera aerobia, dando lugar a la obtención del compost. Este producto cumplió

con los parámetros de calidad de la normativa colombiana para los productos orgánicos a ser usados como fertilizantes o enmiendas, que incluye el requisito de separación en fuente para la materia prima FORSU. La calidad del compost obtenido permitió su uso como enmienda en la superficie del morro, sustituyendo la compra de fertilizantes de síntesis que venían siendo aplicados en el proceso de generación de cobertura vegetal, en un esquema de paisajismo de jardinería.

3.6. Biorrefinería FORSU: energía-compost-acuaponía

En cuanto a la producción de peces, en las primeras siembras se tuvo un problema de mortalidad que llegó al 85 % en el caso del tanque a densidad media. Se identificó un problema de diseño en los drenajes que provocó la acumulación de precipitaciones en el fondo de los depósitos, el cual se resolvió después de la primera cosecha, con un rediseño de las rejillas. Esto afectó de manera drástica a los peces de la primera cosecha, dado los hábitos de media agua y fondo que presenta la tilapia, que al llegar a los sedimentos entra en contacto con materia orgánica en descomposición con una alta carga bacteriana. Se descartó que la mortalidad se debiera a la disponibilidad de oxígeno o a una alta carga de amoniaco. La concentración de oxígeno fue superior a 5 mg O_2/l, que es el valor óptimo para la especie. En cuanto a la concentración de amoniaco (≤0.5 mg/l NH3), se mantuvo por debajo del valor tóxico de referencia de 2 mg/l NH3 (Sierra de la Rosa et al., 2024).

Una vez resuelta la acumulación de sedimento, se sembraron alevinos a una densidad de 65 y 150 peces/tanque, respectivamente. Aunque la mortalidad disminuyó, la cosecha mostró una baja tasa de crecimiento que se atribuyó al efecto de la temperatura ambiente que estuvo entre 4 y 9 ºC por debajo de la temperatura óptima para la especie seleccionada. Según datos de referencia de crecimiento para esta especie, una tilapia de 21 semanas (~ 150 días), cultivada a temperatura óptima (28-30 ºC), tendría un peso aproximado de 180 g, lo cual contrasta con los 104.7 ± 33.4 g de peso promedio obtenido en los tanques de baja densidad y aún más con los 35.9 ± 15.2 g de peso promedio obtenido en los tanques de densidad media (Sierra de la Rosa et al., 2024). Los tiempos de cosecha en el módulo

hidropónico correspondieron a lo reportado en la literatura para las especies trabajadas. Para lechuga y albahaca, se tuvo cosecha entre 40-50 días, mientras que para las plantas de alto porte el tiempo fue de 70-80 días. La cosecha arrojó productos de muy buena calidad, evidenciada el desarrollo de biomasa y parámetros organolépticos (Sierra de la Rosa et al., 2024).

4. Conclusión capitular

Con base en los resultados del estudio comparativo de estabilización de residuos orgánicos separados versus sin separación en fuente, se ratifica el postulado de que, para hacer un aprovechamiento material de estos residuos, en la orientación de su retorno a los suelos agrícolas es indispensable el establecimiento de estrategias integrales de gestión que garanticen la disponibilidad y calidad del FORSU. Al no tener separación en fuente, no hay garantía de inocuidad sanitaria de las materias primas, lo que ocasiona un incremento significativo de riesgo de inclusión de residuos peligrosos en el material.

La transición de la gestión de residuos sólidos municipales, de la disposición final a la recuperación-valorización, se alinea con el objetivo de desarrollo sostenible 12 (ODS12) de garantizar modelos sostenibles de producción y consumo. La gestión ecológica de los residuos a lo largo de su ciclo de vida, meta 4 del ODS-12, se aborda mediante el sistema de valorización energética y material planteado para FORSU, que convierte la basura en un insumo para la agricultura. Al retornar a los suelos, en forma de enmiendas o fertilizantes, la materia orgánica que se extrae como biomasa de los cultivos, se está contribuyendo a la meta 5 del ODS 12.

En las condiciones del territorio colombiano, la sostenibilidad ambiental y financiera de este tipo de plantas de aprovechamiento de FORSU debe dar el retorno de la materia orgánica a su origen en formulaciones de enmiendas o fertilizantes. Los sistemas de producción agropecuaria en los entornos periurbanos de las grandes ciudades demandan un sistema que garantice seguridad sanitaria y ambiental para garantizar la inocuidad de estos materiales como insumos agrícolas.

Los programas de separación en fuente para acopiar la biomasa residual de los residuos sólidos urbanos, son requisito para generar coproductos que cumplan con la normatividad colombiana aplicada por el instituto

colombiano agropecuario. La sinergia de los tres componentes (bio-digestión, larvas y acuaponía) permite un eficiente reciclaje de nutrientes a partir de fuentes orgánicas, en este caso particular, hortalizas y frutas de descarte de un supermercado local, que usualmente son tratadas como desperdicios. Este modelo de bio-refinería tiene el potencial de reducir emisiones, al tiempo que produce energía, alimentos para humanos y fuentes alternativas de alimento para animales de cultivo.

Los sistemas acuapónicos reciclan el agua además de los nutrientes y requieren poco espacio, lo que los convierte en sistemas con potencial para comunidades rurales o urbanas de bajos/medianos ingresos en prácticamente todas las regiones del territorio colombiano. Este tipo de sistema productivo amerita continuar el proceso de investigación y desarrollo para optimizar la productividad a la par de una fácil operatividad y bajos costos de mantenimiento.

5. Referencias

Dávila, C. (2024). *Implementación de una medida de control ambiental para el proceso de combustión interna* [Tesis de maestría. Repositorio institucional.]. Universidad de Antioquia. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/38289/2/D%c3%a1vilaCarlos_2024_MoraviaCombusti%c3%b3nResiduos.pdf

Dhull, P., Lohchab, R. K., Kumar, S., Kumari, M., Shaloo, & Bhankhar, A. K. (2023). *Anaerobic Digestion: Advance Techniques for Enhanced Biomethane/* Biogas Production as a Source of Renewable Energy. Bioenergy Research. https://doi.org/10.1007/s12155-023-10621-7

Duque Márquez, I., Avendaño García, N., Eduardo Bayona Bonilla, Armando Ojeda Acosta, Amanda Bustos Pineda, K., Madrid Gallego, N., Margarita Camelo Olarte, D., Alejandra Páez Lugo, Marlon Jaramillo Zapata, & Paula Andrea Mora Adán. (2021). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2020*. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inlinefiles/informe_df_2020%20%281%29.pdf

Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(6). https://doi.org/10.3390/

ijerph16061060

Juan F- Sierra de la Rosa, Nora Restrepo-Sánchez, Carlos Peláez, Joe Sánchez, & Carlos Uribe. (2024). Sustainable Production of Energy and Alternative Fish Feed by Anaerobic Biodigestion and Insect Culture from Waste Biomass Utilisation. In I. Y. and D. R. Helen Macbeth (Ed.), *Fish as Food: Anthropological and Cross disciplinary Perspectives* (pp. 255–274).

Helen Macbeth, Iain Young & Diana Roberts (ed.), Fish As Food Anthropological And Cross Disciplinary Perspectives, Enfield, ICAF UK, 2024: ICAF UK, Helen Macbeth, Iain Young & Diana Roberts (ed.). *Free Download, Borrow, and Streaming*. Internet Archive.

ICONTEC. Norma Técnica Colombiana NTC 5167. (2011). *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. https://es.scribd.com/document/451121592/NTC-5167

Posada, E., & Colombia, H. A. S. (2019). Perspectives of Project Engineering in the Disposal of Solid Waste in Colombia and Possibilities of Energy Use and Valuation. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, *6*(9), 22–44. https://doi.org/10.5281/zenodo.3464941

Ram, C., Kumar, A., & Rani, P. (2021). Municipal Solid Waste Management: A Review of Waste to Energy (WtE) Approaches. *BioResources*, *16*, 4275–4320. https://www.semanticscholar.org/paper/Municipal-solid-waste-management%3A-A-review-of-waste-Ram-Kumar/83bcaa14f65943143dcbe20b2e6f34f8fc953baf

Sánchez Marín, J. (2019). A*provechamiento energético y material mediante digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que se producen en el barrio Moravia - Medellín*. [Tesis de Maestría. Repositorio institucional.]. Universidad de Antioquia. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/14222/1/SanchezJoe_2019_AprovechamientoEnergeticoMaterial.pdf

Tai, J., Zhang, W., Che, Y., & Feng, D. (2011). Municipal solid waste source-separated collection in China: A comparative analysis. *Waste Management*, *31*(8), 1673-1682. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.014

Tsegaye, D., Khan, M. M., & Leta, S. (2023). Optimization of Operating

Parameters for Two-Phase Anaerobic Digestion Treating Slaughterhouse Wastewater for Biogas Production: Focus on Hydrolytic–Acidogenic Phase. *Sustainability* (Switzerland), *15*(6). https://doi.org/10.3390/su15065544

UT FORSU Medellín - Unión Temporal Aprovechamiento FORSU Medellín (2023). Informe Final Contrato PAF-ATF-C-014-2021. Elaboración de los Estudios y Diseños de una Planta de Aprovechamiento Energético y Material Mediante el Tratamiento de Residuos Orgánicos en la Ciudad de Medellín.

Yepes-García, J. A., & Villarraga-Herrera, M. R. (2018). Análisis de los asentamientos en los rellenos sanitarios La Pradera y Curva de Rodas. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, *43*, 24-33. https://doi.org/10.15446/rbct.n43.61433

Zielińska, M., & Bułkowska, K. (2024). Sustainable Management and Advanced Nutrient Recovery from Biogas Energy Sector Effluents. *Energies*, *17*(15). https://doi.org/10.3390/en17153705