



PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA INDUSTRIAL PARA EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA EL MUNICIPIO DE ARANDAS, JALISCO

PROPOSAL FOR THE DESIGN OF AN INDUSTRIAL PLANT FOR THE TREATMENT OF SOLID URBAN WASTE FOR THE MUNICIPALITY OF ARANDAS, JALISCO

Norberto **Santiago-Olivares**¹; Samuel **Íñiguez-Gómez**²; Javier Isaac **Contreras-Ochoa**² y Guadalupe Jacqueline **Hernández-Hernández**³

¹Profesor de Tiempo Completo en el Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Campus Arandas, Av. José Guadalupe Tejeda 557, Arandas, Jalisco, México. ²Profesor de Asignatura en el Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Campus Arandas, Av. José Guadalupe Tejeda 557, Arandas, Jalisco, México. ³Alumno de la Carrera de Ingeniería Ambiental del Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Campus Arandas, Av. José Guadalupe Tejeda 557, Arandas, Jalisco, México.

RESUMEN

Uno de los grandes problemas en las ciudades es el manejo y disposición de los residuos sólidos urbanos, puesto que se generan grandes volúmenes de estos y no hay una separación de los mismos en los puntos de generación. El inicio de una solución a este problema, es separar la basura desde el hogar en residuos inorgánicos, residuos orgánicos y residuos sanitarios, para después ser recolectados y darles un tratamiento posterior, buscando el desarrollo sustentable en la comunidad. En el presente proyecto se consideró tratar la fracción de los residuos sólidos orgánicos (RSO) mediante un proceso de compostaje con fermentación acelerada, con ayuda de biorreactores (sistema cerrado), que puede reducir el tiempo de compostaje de cuatro meses (tiempo promedio estimado de compostaje en sistema abierto) a menos de dos meses. Para el tratamiento de los residuos inorgánicos se consideró implementar un sistema de separación en los diferentes tipos: metales, plásticos, papel y cartón, vidrio, telas y residuos peligrosos; para después darles un pretratamiento (en caso de ser necesario) para su venta posterior; en el caso de los residuos peligrosos, habría que confinarlos en un relleno sanitario, con el resto de los residuos no aprovechables: tierra, piedras, desperdicios de construcción, etc. Además, se consideró que los residuos sanitarios (junto con residuos textiles y plásticos no reciclables) se podrían quemar en una caldera de sólidos acoplada a un turbogenerador para la producción de energía eléctrica (necesaria en los motores de transmisión de movimiento de la planta); pero no fue factible por problemas técnicos que se comentan más adelante. Con apoyo del H. Ayuntamiento de Arandas y del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, campus Arandas, se logró diseñar, construir y hacer las

pruebas técnicas de un prototipo de biorreactor aerobio continuo de fermentación acelerada. Con los resultados obtenidos se realizó el escalamiento del equipo biorreactor piloto a nivel industrial, de acuerdo a la cantidad generada de RSO en el municipio de Arandas, para posteriormente, diseñar la planta de tratamiento de los residuos orgánicos. Para el diseño de la planta de residuos sólidos inorgánicos se determinaron los diferentes equipos necesarios, sus características, capacidad y costo. Además, se realizó la cotización de la obra civil requerida para la planta de tratamiento y la instalación de la energía eléctrica.

Palabras clave: planta de tratamiento de residuos sólidos, biorreactores, compostaje, separación de basura, residuos sólidos urbanos (RSU).

ABSTRACT

One of the biggest problems in cities is the management and disposal of urban solid waste, since large volumes are generated and there is no separation at the generation points. The beginning of a solution to this problem is to separate the garbage from home into inorganic waste, organic waste and sanitary waste, to be then collected and given a subsequent treatment, seeking sustainable development in the community. In the present project we considered treating the fraction of organic solid waste (RSO) through a composting process with accelerated fermentation, with the help of bioreactors (closed system), which can reduce the composting time of four months (estimated average time of open-system composting) to less than two months. For the treatment of inorganic waste we considered implementing a separation system into different types: metals, plastics, paper and cardboard, glass, fabrics and hazardous waste; to then give them a pre-treatment (if necessary) for subsequent sale; in the case of

hazardous waste, they should be confined to a sanitary landfill, with the rest of the unusable waste: dirt, rocks, construction waste, etc. In addition, we considered that sanitary waste (together with textile waste and non-recyclable plastics) could be burned in a solid boiler coupled to a turbogenerator for the production of electrical energy (necessary in the motors of motion transmission of the plant); however it was not feasible due to technical problems that are discussed below. With the support of the Arandas' City Hall and the José Mario Molina Pasquel and Henríquez Technological Institute, Arandas campus, we were able to design, build and make the technical tests of a prototype of aerobic continuous bioreactor of accelerated

fermentation. With the results obtained, the scaling of the pilot bioreactor equipment was carried out at the industrial level, according to the amount generated by RSO in the municipality of Arandas, and later, designing the treatment plant for organic waste. For the design of the inorganic solid waste plant, the different necessary equipment, their characteristics, capacity and cost were determined. In addition, we performed the pricing of the civil works required for the treatment plant and the installation of the electric power.

Key words: solid waste treatment plant, bioreactors, composting, garbage separation, urban solid waste (USW).

INTRODUCCIÓN

El compostaje ha sido empleado por los agricultores desde hace siglos, como un medio de aporte complementario de suplementos orgánicos baratos, de buena calidad y fácilmente accesibles para sus tierras; en la actualidad, los agricultores que todavía compostan en sus fincas son minoría, sin embargo, ha crecido el compostaje industrial fundamentalmente de residuos sólidos urbanos orgánicos, con el fin de recuperar la materia orgánica que se desecha con grandes costos económicos y ecológicos, y obligados por los problemas de contaminación y de impacto ambiental que la eliminación de los residuos urbanos comporta (Barradas, 2009).

Chávez, *et al.* (2011) evaluó el efecto de dos aceleradores biológicos en la reducción del tiempo requerido para la degradación de la materia orgánica y elevar la calidad del producto final (composta). Los aceleradores utilizados fueron BIOCUMPOS de tipo comercial (BR1) y lodos activados provenientes del tratamiento de aguas municipales (BR2); además un ensayo testigo sin acelerador (BR3). El experimento se llevó a cabo en bio-reactores piloto diseñados en el Instituto Tecnológico de Boca del Río (ITBOCA), Veracruz, México; utilizando como sustratos desechos orgánicos de la cafetería y áreas verdes del mismo tecnológico, así como de los restaurantes de la zona turística del municipio. Concluyó que los lodos activados son una alternativa para ser utilizados como acelerador biológico, en la elaboración de compostas, las cuales se obtienen con características de composición de una composta madura, por lo tanto, puede ser utilizada como fertilizante; con un tiempo menor al proceso de composteo comparado con el proceso tradicional.

La Ley de Gestión Integral de los Residuos Sólidos del Estado de Jalisco (LGIREJ, 2007), les otorga a los municipios diversas atribuciones para la gestión integral de los RSU (art. 8°), entre las cuales está el establecimiento de sistemas para el tratamiento y disposición final. Sin embargo, las tasas de generación se incrementan día con día como consecuencia de los hábitos de consumo generalizado de productos y la demanda de servicios por parte de la población, junto con la dinámica económica, lo que complica aún más su disposición.

En el año 2015, el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), con apoyo del CONACYT, realizó una caracterización de los RSU del municipio de Arandas, Jalisco. En el reporte final se estima la cantidad de RSU generados diariamente en el municipio (70.264 toneladas), la composición en porcentaje (23.09% de residuos sólidos orgánicos), el porcentaje de humedad (10.33%), el peso volumétrico (115.3 kg/m³), el poder calorífico superior (14.31 MJ/kg), entre algunas otras determinaciones (cenizas y metales pesados por ejemplo).

Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

Madrid (2012) en su tesis, presenta un plan de manejo integral de residuos sólidos del mercado central del Cantón Esmeraldas, en la que discute la importancia de la concientización de la separación de los residuos sólidos para un posterior tratamiento, pero que no tiene sentido separar los residuos, si no se tiene un tratamiento establecido para cada tipo de residuo. Arboleda (2009), en su tesis propone un programa de manejo integral de residuos sólidos en el Parque Nacional Natural Gorgona, Cauca, Colombia. Menciona que se debe concientizar a los visitantes sobre la generación de residuos en el parque, puesto que la producción per cápita en el parque es superior al promedio del país.

En Colombia, la reincorporación de la fracción aprovechable de los Residuos Sólidos Municipales al ciclo productivo se ha fortalecido con la implementación de Plantas de Manejo de Residuos Sólidos. La determinación del flujo de residuos permitió establecer interrelaciones entre las características y cantidades de residuos con las fuentes de generación y las formas de aprovechamiento, obteniendo elementos fundamentales para la sostenibilidad de las Plantas (Marmolejo *et al.*, 2009).

Escamilla (2012) en su tesis doctoral presenta una evaluación técnico-económica para la implementación de un sistema de compostaje en pila estática, utilizando como sustratos desperdicios de la planta de nopal y estiércol de vaca, para la delegación Milpa Alta de la Ciudad de México. En su tesis demuestra que el proyecto es totalmente factible. Tejada (2013) en su tesis de maestría expone una estrategia para la gestión y manejo de los RSU en la ciudad de la Paz, Baja California Sur.

Santiago *et al.* (2017), realizó un estudio sobre el nivel de concientización de la población de Arandas, Jalisco, con el objetivo de determinar el índice de disposición que se tiene para la separación de los residuos en el hogar; los resultados fueron muy satisfactorios, y se concluyó que la población Arandense sí está preocupada por la conservación del medio ambiente y que hay una muy buena disposición para la separación de la basura en el hogar. Además, plantea que la solución al problema de la basura, inicia con la separación de los residuos desde el sitio de generación, pero no tiene ningún sentido separar la basura si no se tiene un sistema de tratamiento posterior establecido.

El Compostaje

El compostaje es un proceso biológico aerobio, que bajo condiciones de aireación, humedad y temperaturas controladas y combinando fases mesófilas (temperatura y humedad medias) y termófilas (temperatura superior a 45 °C), transforma los residuos orgánicos degradables, en un producto estable e higienizado, aplicable como abono o sustrato (Negro *et al.*, 2000); se puede aplicar tanto a gran escala (a nivel municipal o empresarial), como individualmente (en el jardín, en la finca); para instalar una planta de compostaje no se necesita una gran inversión ni una formación técnica (Röben, 2002).

Con el compostaje, se pueden lograr las siguientes ventajas económicas y ecológicas: (Röben, 2002)

Ventajas económicas:

- Extensión de la vida útil del relleno sanitario municipal (no es necesario la inversión en un terreno para un nuevo relleno prematuramente)
- Venta o uso del compost
- Venta o uso de las lombrices (si se realiza el compostaje con el sistema de lombricultura)
- Reemplazo de fertilizadores artificiales por un producto más económico y natural.

Ventajas ecológicas:

- Producción de menos aguas lixiviadas y gases contaminados.
- Menos consumo de terreno, menor impacto al paisaje, al suelo y a las aguas subterráneas (porque se disminuye el volumen de basura que se va al relleno)
- Producción de humus que puede servir como estabilizador contra la erosión.
- El compost es un fertilizador natural que no produce sobrecarga química al suelo.

En plantas de compostaje, este proceso natural es optimizado con ayuda de ingeniería. Después del compostaje completo, el producto - la tierra humus que se llama "compost" o "abono" - es impecable desde el punto de vista de la higiene y se puede utilizar para la horticultura, agricultura, silvicultura, el mejoramiento del suelo o la arquitectura del paisaje. Con la utilización de plantas de compostaje, la cantidad de basura destinada para la disposición final en un relleno o botadero se puede reducir a un 50 %. Este porcentaje puede variar según la composición de la basura. En caso que los desechos reciclables sean recogidos separadamente y los desechos orgánicos sean compostados, el porcentaje de la basura descargada en el relleno puede reducirse a un 35 - 40 % (Röben, 2002).

Equipo para compostaje

Los métodos de compostaje se pueden clasificar en sistemas abiertos y sistemas cerrados. En los sistemas abiertos se encuentran el composteo en "pilas" y el vermicompostaje (composteo con lombrices). En los sistemas cerrados se encuentran los reactores, que pueden ser aerobios (con presencia de oxígeno) o anaerobios (ausencia de oxígeno). Los reactores aerobios son utilizados para producir composta como producto, mientras que los reactores anaerobios (generalmente llamados biodigestores) tienen como producto principal, el gas metano.

Los sistemas cerrados, que podríamos llamar industrializados, son recipientes de tamaño variable en los que se lleva a cabo el compostaje, puestos en marcha por entidades públicas o privadas y que generalmente se utilizan para compostar residuos en las proximidades de ciudades de tamaño medio o grande. En estos sistemas, la fase inicial de fermentación se realiza en reactores que pueden ser de dos tipos: horizontales o verticales, mientras que la fase final de maduración se hace al aire libre o en naves abiertas. Son sistemas desarrollados para reducir considerablemente las superficies de compostaje y lograr un mejor control de los parámetros de fermentación y controlar los olores de forma más adecuada (Negro *et al.*, 2000).

En los sistemas cerrados continuos se utilizan reactores de 4-10 m de altura, con un volumen total de 1000 a 3000 m³ (Figura 1). El biorreactor consta de un cilindro cerrado, aislado térmicamente, que en su parte inferior posee un sistema de aireación y extracción de material. El material se introduce por la parte superior mediante un tornillo alimentador. A medida que se va extrayendo el material compostado, el material fresco va descendiendo. El control de la aireación se realiza por la temperatura y las características de los gases de salida (éstos son aspirados por la parte superior del reactor), el tiempo de residencia es de 2 semanas (Negro *et al.*, 2000).



Figura 1. Reactor cilíndrico (Saña y Soliva, 1987).

Naturaleza del diseño

Partiendo de un planteamiento de un problema, definido vagamente como una necesidad del cliente o de un conjunto de resultados experimentales, los ingenieros químicos pueden desarrollar una comprensión de la ciencia física subyacente importante relacionada con el problema y utilizar esta comprensión para crear un plan de acción y un conjunto de especificaciones detalladas, que, si se aplican, llevarán a los resultados financieros previstos (Sinnott *et al.*, 2012).

Cuando se consideran posibles maneras para conseguir el objetivo, el diseñador se verá limitado por muchos factores, lo que limitará el número de diseños posibles. En raras ocasiones existe una única solución posible al problema, sólo un diseño. Normalmente son posibles varias maneras alternativas para conseguir el objetivo, incluso varios diseños buenos, dependiendo de la naturaleza de las limitaciones (Sinnott *et al.*, 2012).

Estas limitaciones en las posibles soluciones a un problema de diseño se presentan de muchas maneras. Algunas limitaciones serán fijas e invariables, tales como aquellas que surgen de las leyes físicas, regulaciones gubernamentales y estándares. Otras serán menos rígidas, y el diseñador las puede "relajar" como parte de la estrategia general de búsqueda del mejor diseño. Las limitaciones que están fuera de la influencia del diseñador se pueden considerar limitaciones externas. En la *Figura 2* se muestra este

conjunto de límites externos de diseños posibles. Dentro de estos límites habrá un número de diseños plausibles constreñidos por otras limitaciones, las limitaciones internas, sobre las cuales el diseñador tiene algún tipo de control; tales como, elección del proceso, elección de las condiciones de proceso, de los materiales y del equipo (Sinnott *et al.*, 2012).



Figura 2. Limitaciones de diseño (Sinnott *et al.*, 2012).

Las consideraciones económicas obviamente son la principal limitación en cualquier diseño de ingeniería: las plantas deben proporcionar un beneficio. El tiempo también será una limitación. El tiempo disponible para completar un diseño limitará normalmente el número de diseños alternativos que se puedan considerar. En la Figura 3 se muestra un diagrama de las etapas en el desarrollo de un diseño, desde la identificación inicial del objetivo hasta el diseño final (Sinnott *et al.*, 2012).

La Figura 3 muestra el diseño como un procedimiento, a medida que el diseño se desarrolla, el diseñador será consciente de más posibilidades y limitaciones, y estará constantemente buscando nuevos datos e ideas, y evaluando posibles soluciones del diseño (Sinnott *et al.*, 2012).

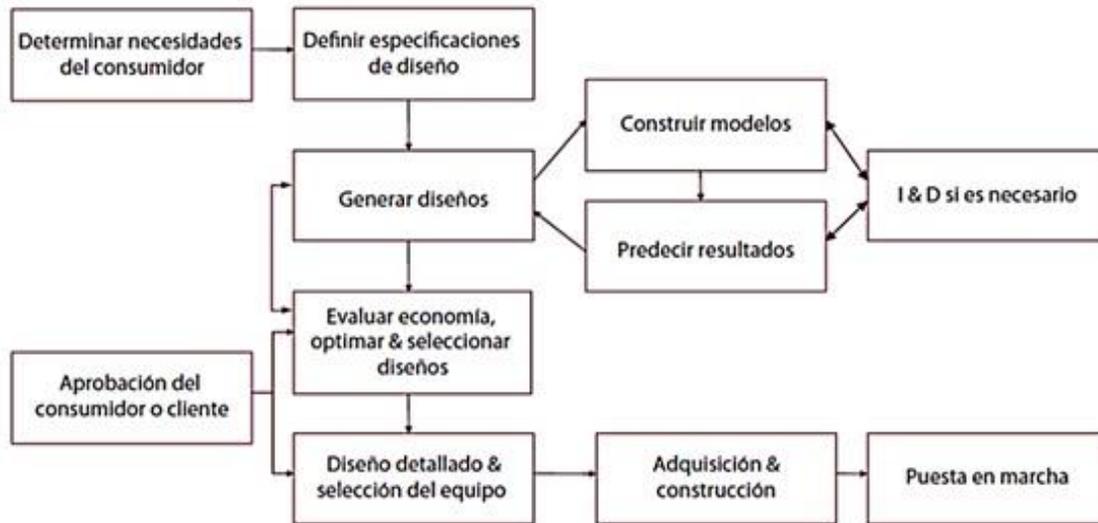


Figura 3. El proceso de diseño (Sinnott *et al*, 2012).

MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es aplicada, puesto que se utiliza el conocimiento para el diseño de la planta de tratamiento de residuos, la determinación de los equipos necesarios, la distribución de la planta en el sitio y la gestión para determinar la inversión requerida.

Para la planta de tratamiento de residuos inorgánicos, se consideró la separación de los residuos reciclables mediante una banda transportadora y para la planta de tratamiento de residuos orgánicos, se realizó el escalamiento a nivel industrial del biorreactor aerobio para la fermentación acelerada, a partir de los resultados obtenidos en las pruebas técnicas del equipo piloto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el apoyo del H. Ayuntamiento de Arandas y del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Campus Arandas, se construyó un equipo piloto de biorreactor aerobio para la conversión de la fracción orgánica en composta, en el cual se realizaron algunas pruebas técnicas, obteniéndose resultados satisfactorios. Si se cuenta con un sistema de tratamiento para los residuos sólidos urbanos generados en un municipio, es más sencillo convencer a la población de que separen la basura en las diferentes fracciones. En este sentido, en el presente proyecto se realizó el diseño de la planta industrial para el tratamiento de los residuos sólidos municipales y se determinó la inversión requerida, lo que implicó el diseño de la planta de tratamiento de residuos sólidos orgánicos y el diseño de la planta de tratamiento de residuos sólidos inorgánicos. Cabe mencionar que, para el diseño de la planta de tratamiento de residuos sólidos orgánicos para la producción de composta, se tomaron de base los resultados de las pruebas técnicas realizadas con el equipo biorreactor piloto.

La idea de utilizar un sistema aerobio (presencia de oxígeno) en lugar de uno anaerobio (ausencia de oxígeno) para el diseño de la planta de residuos sólidos orgánicos, es porque el primero es más amigable con el medio ambiente, puesto que solo se acelera la degradación de la materia orgánica que se lleva a cabo de manera natural, cumpliendo así el ciclo ecológico, puesto que la composta generada es regresada a la tierra, de donde partieron alguna vez las plantas de donde provienen los residuos orgánicos (los animales domésticos también son alimentados con plantas y/o productos de las mismas).

Diseño de la planta de tratamiento de residuos sólidos inorgánicos

Para la planta de tratamiento de residuos sólidos inorgánicos se cotizaron los equipos más idóneos para realizar la separación manual (y dar empleo a los pepenadores que ya trabajan en el relleno sanitario) de los residuos reciclables, no reciclables y peligrosos, mediante una banda transportadora; los residuos reciclables se pueden clasificar en: papel, cartón, metales, plásticos y vidrio.

Se consideraron equipos de molienda para reducir el volumen de los plásticos y un Bobcat para alimentar la banda transportadora. Todo esto en una nave industrial. Para la implementación de la planta de tratamiento se consideró el terreno que se tiene disponible a un lado del relleno sanitario actual. Ver la cotización de los equipos, nave industrial y obra civil en *Figuras 4a y 4b*, así como la distribución de planta en la *Figura 5*. También se contempló la incineración de los residuos sólidos sanitarios, textiles, madera y algunos plásticos no reciclables (que representan aproximadamente un 15% de la basura total, es decir, entre 10 y 12 toneladas diarias), utilizando un horno incinerador fabricado con ladrillo refractario en el sitio, equipado con quemadores de gas butano o diésel, tolva de alimentación y chimenea con tratamiento de gases de combustión para minimizar las emisiones a la atmósfera; este equipo es opcional.

Aunque el horno incinerador es opcional, es deseable su implementación, puesto que ayudaría a incrementar el tiempo de vida útil del relleno sanitario de 6 a 8 veces más el tiempo de vida proyectado, de otra manera solo se puede incrementar de 2 a 3 veces más. También se consideró un equipo montacargas que opera con gas como combustible, aunque también es opcional, es conveniente para cargar los residuos sólidos reciclables a los vehículos de transporte correspondientes que se los llevarían de la planta a su destino final.

Cabe mencionar que en lugar del horno incinerador, se había contemplado un turbogenerador (caldera de sólidos acoplada a una turbina) para la generación de energía eléctrica, y que ésta se aprovechara en los motores de la planta en general, pero lamentablemente al investigar sobre los posibles proveedores, se descubrió que en México no se fabrican ese tipo de equipos; y al cotizar con proveedores extranjeros, señalaron que para que el equipo sea rentable, se requieren por lo menos 120 toneladas diarias para quemar (y solo se tienen alrededor de 10 toneladas diarias de este tipo de residuos); por lo que esta opción tuvo que descartarse.

No.	DESCRIPCIÓN	IMPORTE
1	Minicargador BOBCAT CATERPILLAR, modelo S450, año 2018, a diesel	\$ 36,842.11
2	Banda transportadora lineal de 1 m de ancho, 15 m de largo y 1.1 m de alto, soportes de PTR en acero inoxidable cada 3 m, banda de 3 capas uso rudo color negro, motorreductor de 3 HP 220-440 volts y variador de velocidad.	\$ 8,105.27
3	Molino para plásticos PET, PVC, PP, PEAD, ABS, PS, PEBD, PA, modelo HSS800-A, motor de 30 HP trifásico, 650 kg/h de capacidad, 4 cuchillas fijas y 24 móviles	\$ 30,078.96
4	Incinerador de plásticos no reciclables, textiles y residuos sanitarios, fabricado con ladrillo refractario, incluye cañones de gas o diesel, tolva de alimentación, chimenea con tratamiento para gases de combustión y parrilla de incineración	\$ 52,631.58
5	Bodega para separación de inorgánicos de 8 m de ancho, 25 m de longitud y 6 m de altura, incluye zapatas y techo de lámina PINTRO C-26 color blanco	\$ 8,270.68
6	Electrificación 110 y 220 V	\$ 15,789.47
7	Montacargas HYSTER 5,000 LIBRAS, modelo S50FT, año 2014 a gas LP	\$ 21,052.63
8	Banda transportadora lineal de 1 m de ancho, 5 m de largo y 1.1 m de alto, soportes de PTR en acero inoxidable cada 3 m, banda de 3 capas uso rudo color negro, motorreductor de 1 HP 220-440 volts y variador de velocidad.	\$ 4,552.63
9	Techo para separación de orgánicos de 4 m de ancho, 7 m de longitud y 6 m de altura, incluye zapatas y techo de lámina PINTRO C-26 color blanco	\$ 1,052.63
10	Chipeadora-trituradora BEAR CAT SC5540B para PTO. Capacidad de corte hasta de 5" (13 cm) de diámetro. Ideal para uso comercial o profesional en áreas verdes municipales, privadas ó industriales, campos de golf o huertos de tamaño medio / grande. Equipo altamente eficaz para reducir malezas, hojas y podas, así como cualquier otro tipo de residuos orgánicos; ideal para producir composta. Cuenta con un rotor chipeador para cortar el material leñoso y con un tambor con cuchillas trituradoras reversibles con filo de sierra para triturar el material menos fibroso como hojas, ramas pequeñas y demás material orgánico. Este sistema garantiza un menor consumo de energía, menor vibración y por lo tanto una mayor vida útil, además de que produce un tamaño de viruta más pequeño y uniforme que se descompone más rápido. Su exclusivo diseño permite una alimentación del material continua, segura y con el mismo esfuerzo del operador. Enganche a 3 pts cat I o II para tractor agrícola con TdF a 540 RPM, alimentación manual. Doble tolva de entrada; una directamente al rotor para materiales leñosos y otra al tambor para triturar desechos orgánicos menos fibrosos. Rotor de 20" x ¼", equipado con 4 cuchillas chipeadoras reversibles tratadas térmicamente. Tambor con 36 martillos trituradores con filo de sierra. Ventilador y tubo de descarga con giro de 360. Palanca de 5 posiciones para elegir el tamaño de la viruta, sin necesidad de cribar. Accionamiento por medio de doble banda, flecha cardan italiana. Capacidad promedio de 13 m3 por hora.	\$ 7,894.74
11	Bodega para composta madura e inmadura de 20 m de ancho, 30 m de largo y 6 m de altura, incluye zapatas y techo de lámina PINTRO C-26 color blanco	\$ 36,664.00
12	Tela textil para cubrir composta inmadura, marca MIRAFI TOP TEX de 6 m de ancho y 50 m de largo	\$ 41,116.00

Figura 4a. Estimación de la inversión para la planta de RSU utilizando biorreactores (parte 1). (Elaboración propia).

13	Multiprocesador de composta GACELA AUTOPROPULSADA PREMIER, con capacidad de trabajo de 550-1000 m ³ /h, dimensiones de trabajo: 3.05 m de ancho X 1.45 m de alto. Medidas totales: 2.45 m ancho X 5.30 m largo X 3.90 m de alto. Peso aproximado 3500 kg. Cuenta con sistema de rodillos para cobertura de composta con geosintético. Por sus características y tecnología (Autopropulsada eléctrica con generador y motores eléctricos) es la única en América Latina. Por sus características se puede usar en procesos agropecuarios, agroindustriales y municipales. Para: Desechos de invernaderos, sustratos de hidroponía, mortandad de aves (cerdos y bovinos segmentados), pacas de rastrojo, bagazo de industria tequilera, lirio acuático, viseras de carne de rastros, etc.	\$ 187,500.00	
14	Cribadora circular Trommel screen heavy duty. Modelo INAGRIND TOPO 312, con segundo cilindro de cribado (segundo cilindro diferente según necesidades) de 3' (.92m de diámetro) x 12' (3.84 m de largo). Con malla ¼ a 1" según pedido. Criba de acero alto carbón calibre 10, equipada con motor de 5 HP a 240 V de 3 fases con gabinete plástico, arrancador a plena carga con botonadura de encendido y paro. Cuenta con sistema de transporte fabricada en acero estructural, rodillo de cribado circular libre, sprockets con dientes endurecidos, capacidad de proceso de 8 a 50 m ³ /h según orificio de criba	\$ 25,900.00	
15	Tractor agrícola marca JOHN DEERE, modelo 5415 DT con creepeer, motor de 77 HP 4 cilindros, equipado con cargador 562SL para tractores serie 5000 Synchron, bastidores de montaje, joystick, cucharón de 0.43 m ³	\$ 38,894.74	
16	Camión de volteo VOLVO de 7 m ³ , modelo VLN, año 2009	\$ 34,210.53	
17	Asesoría en la instalación de equipo, administración, arranque y puesta en marcha del proyecto	\$ 13,200.00	
18	Remolque agrícola con tanque de 5000 litros. Ejes tándem cama baja 14000 lbs. Llantas 11 L – 16, tanque negro ROTOPLAS 5000 litros reforzado al 20 %, NOM – 009 STPS – 1994, aprobado por la FDA. Bomba 2 X 2, motor HONDA 4 HP gasolina (o equivalente), y mangueras y conexiones. Adaptado para multiprocesador de composta GACELA AUTOPROPULSADA PREMIER.	\$ 10,500.00	
19	Estudio de mecánica de suelos	\$ 4,210.53	
20	Obra civil, incluye: nivelación del terreno, retiro de escombros, excavación, colado de zapatas para bodegas, compactación del terreno, construcción de la placa de concreto para tanques biorreactores y plancha de concreto para molinos y el armado de acero necesario	\$ 78,950.00	
		SUBTOTAL	\$ 657,416.49
	Nota1: el costo de la obra civil puede cambiar según resultados de la mecánica de suelos	16% DE IVA	\$ 105,186.64
		TOTAL	\$ 762,603.13
	Nota2: los precios están dados en dólares y sujetos a cambio sin previo aviso	10% IMPREVISTOS	\$ 76,260.31
			\$ 838,863.44

Figura 4b. Estimación de la inversión para la planta de RSU utilizando biorreactores (parte 2). (Elaboración propia).

Las pilas de composta se ajustaron a las dimensiones de la tela especial que se utilizaría para protegerlas de la lluvia y mantener la humedad por más tiempo, dichas dimensiones son: 6 m de ancho y 50 m de largo; aunque por la forma del terreno se tuvieron que hacer algunos ajustes, considerando áreas de tránsito suficientes para el camión de volteo y para que la volteadora pueda dar la vuelta de regreso sin problemas para voltear otra pila. También se contempló en esta opción, una nave industrial de 20 m de ancho por 30 m de largo y 6 m de altura con techo de lámina, para almacenar la composta madura y que también serviría para resguardar la maquinaria de apoyo en las noches.

Como se puede ver en el Anexo 3, el composteo en pila requiere de prácticamente toda el área disponible del terreno y sólo deja un margen para un 25% de incremento, aunque esta opción es más económica que si se utiliza el biorreactor de fermentación acelerada, en cuanto a inversión se refiere (*Figuras 4a, 4b y 7*).

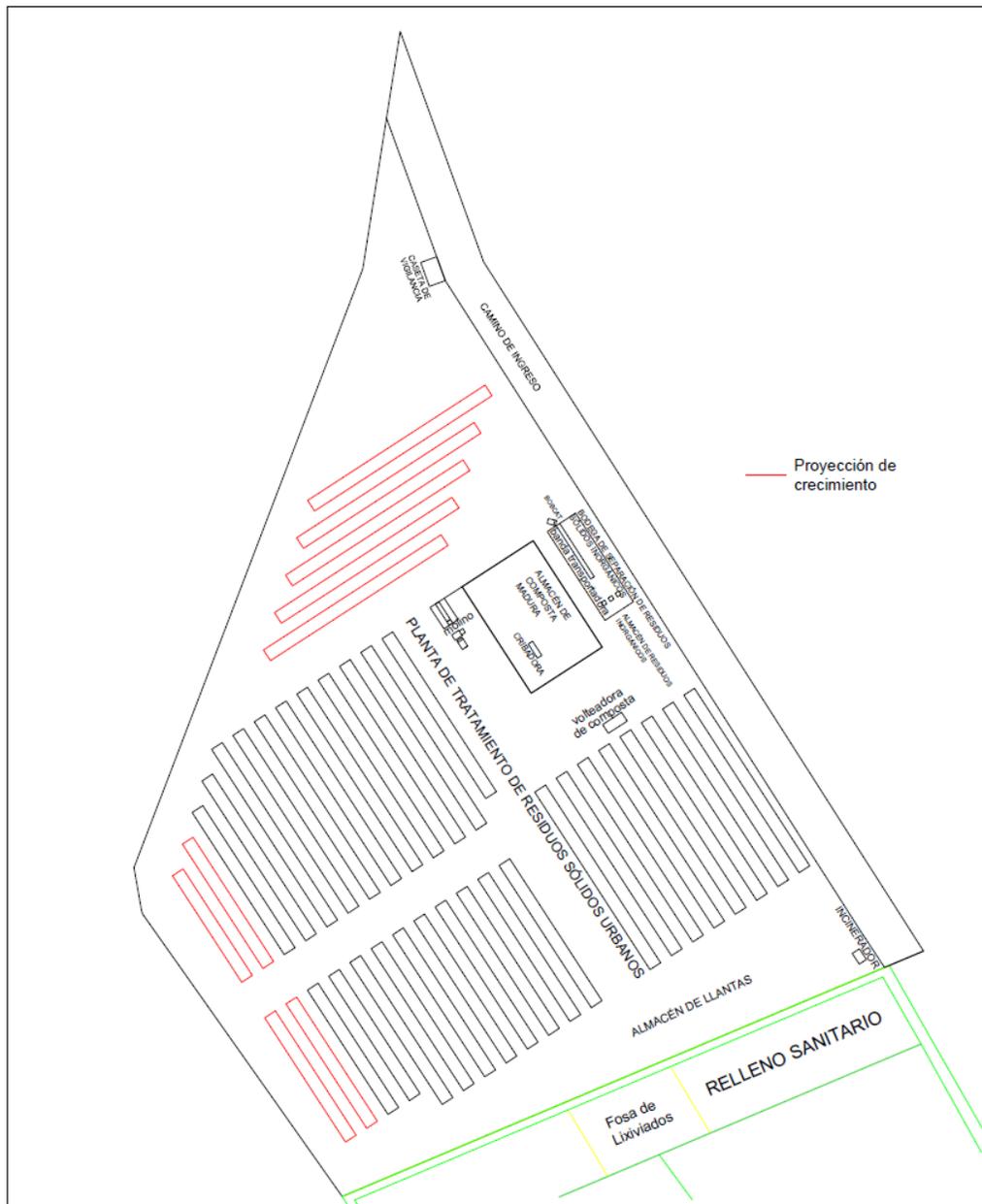


Figura 6. Distribución de la planta de tratamiento sin utilizar biorreactores. (Elaboración propia).

No.	DESCRIPCIÓN	IMPORTE
1	Minicargador BOBCAT CATERPILLAR, modelo S450, año 2018, a diesel	\$ 36,842.11
2	Banda transportadora lineal de 1 m de ancho, 15 m de largo y 1.1 m de alto, soportes de PTR en acero inoxidable cada 3 m, banda de 3 capas uso rudo color negro, motorreductor de 3 HP 220-440 volts y variador de velocidad.	\$ 8,105.27
3	Molino para plásticos PET, PVC, PP, PEAD, ABS, PS, PEBD, PA, modelo HSS800-A, motor de 30 HP trifásico, 650 kg/h de capacidad, 4 cuchillas fijas y 24 móviles	\$ 30,078.96
4	Incinerador de plásticos no reciclables, textiles y residuos sanitarios, fabricado con ladrillo refractario, incluye cañones de gas o diesel, tolva de alimentación, chimenea con tratamiento para gases de combustión y parrilla de incineración	\$ 52,631.58
5	Bodega para separación de inorgánicos de 8 m de ancho, 25 m de longitud y 6 m de altura, incluye zapatas y techo de lámina PINTRO C-26 color blanco	\$ 8,270.68
6	Electrificación 110 y 220 V	\$ 15,789.47
7	Montacargas HYSTER 5,000 LIBRAS, modelo S50FT, año 2014 a gas LP	\$ 21,052.63
8	Banda transportadora lineal de 1 m de ancho, 5 m de largo y 1.1 m de alto, soportes de PTR en acero inoxidable cada 3 m, banda de 3 capas uso rudo color negro, motorreductor de 1 HP 220-440 volts y variador de velocidad.	\$ 4,552.63
9	Techo para separación de orgánicos de 4 m de ancho, 7 m de longitud y 6 m de altura, incluye zapatas y techo de lámina PINTRO C-26 color blanco	\$ 1,052.63
10	Chipeadora-trituradora BEAR CAT SC5540B para PTO. Capacidad de corte hasta de 5" (13 cm) de diámetro. Ideal para uso comercial o profesional en áreas verdes municipales, privadas o industriales, campos de golf o huertos de tamaño medio / grande. Equipo altamente eficaz para reducir malezas, hojas y podas, así como cualquier otro tipo de residuos orgánicos; ideal para producir composta. Cuenta con un rotor chipeador para cortar el material leñoso y con un tambor con cuchillas trituradoras reversibles con filo de sierra para triturar el material menos fibroso como hojas, ramas pequeñas y demás material orgánico. Este sistema garantiza un menor consumo de energía, menor vibración y por lo tanto una mayor vida útil, además de que produce un tamaño de viruta más pequeño y uniforme que se descompone más rápido. Su exclusivo diseño permite una alimentación del material continua, segura y con el mismo esfuerzo del operador. Enganche a 3 pts cat I o II para tractor agrícola con TdF a 540 RPM, alimentación manual. Doble tolva de entrada; una directamente al rotor para materiales leñosos y otra al tambor para triturar desechos orgánicos menos fibrosos. Rotor de 20" x ¼", equipado con 4 cuchillas chipeadoras reversibles tratadas térmicamente. Tambor con 36 martillos trituradores con filo de sierra. Ventilador y tubo de descarga con giro de 360. Palanca de 5 posiciones para elegir el tamaño de la viruta, sin necesidad de cribar. Accionamiento por medio de doble banda, flecha cardan italiana. Capacidad promedio de 13 m3 por hora.	\$ 7,894.74
11	Bodega para composta madura e inmadura de 20 m de ancho, 30 m de largo y 6 m de altura, incluye zapatas y techo de lámina PINTRO C-26 color blanco	\$ 36,664.00
12	Tela textil para cubrir composta inmadura, marca MIRAFI TOP TEX de 6 m de ancho y 50 m de largo	\$ 4,328.00
13	Multiprocesador de composta GACELA 1000, con capacidad de trabajo de 600-1000 m3/h, dimensiones de trabajo: 3.05 m de ancho X 1.55 m de alto, llantas 11- L - 16. Medidas totales: 2.30 m ancho X 5.60 m largo X 1.85 m de alto. Peso aproximado 2300 kg. Requiere tractor con creeper de 60 - 80 HP en TdeF a 540 RPM (Avance 200-500 m/h). Incluye: protector frontal (pantalonerías), nivelación hidráulica independiente, cuchillas de corte, paletas de ataque ¾" X 4" de acero 5160 (con recubrimiento antidesgaste), sistema de preinyección de agua, tirón trasero. Flecha de 2" en acero 1045 y chumaceras de rodillo. Fabricado con acero ASTM A 500 estructural, flechas 10-45, soldadura de microalambre, chumaceras Dodge, Timken, browning, coples y complementos martin, transmisiones especiales importadas, flechas cardan italianas con clutch, pintura poliuretano base epóxica resistente a ácidos y álcalis	\$ 28,947.37
14	Cribadora circular Trommel screen heavy duty. Modelo INAGRIND TOPO 312, con segundo cilindro de cribado (segundo cilindro diferente según necesidades) de 3' (.92m de diámetro) x 12' (3.84 m de largo). Con malla ¼ a 1" según pedido. Criba de acero alto carbón calibre 10, equipada con motor de 5 HP a 240 V de 3 fases con gabinete plástico, arrancador a plena carga con botonadura de encendido y paro. Cuenta con sistema de transporte fabricada en acero estructural, rodillo de cribado circular libre, sprockets con dientes endurecidos, capacidad de proceso de 8 a 50 m3/h según orificio de criba	\$ 25,900.00
15	Tanque biorreactor aerobio continuo de fermentación acelerada de 350 m3 de capacidad, en acero inoxidable T-304 C-8 y C-10, con 8 patas de tubo de 12" de acero inoxidable cédula 10 y 8 patas de tubo de 8" de acero inoxidable cédula 10	\$ 197,777.89
16	Sistema descompactador de la masa del fondo del tanque biorreactor por medio de empujadores y repartidor de producto, incluye flecha de tubo con sistema de rodamientos, todo en acero inoxidable T-304	\$ 4,026.32
17	Motobomba centrífuga de 2 HP incluyendo sistema de aspersión de tubo de acero inoxidable T-304 para ambos tanques	\$ 3,578.95
18	Tanque para recuperar lixiviados de 1000 litros de capacidad, en acero inoxidable T-304	\$ 552.63
19	Transportador helicoidal de 12" de diámetro para extraer composta del biorreactor, en acero inoxidable T-304, incluye motorreductor	\$ 61,052.63
20	Sistema de aireación en el fondo del tanque, con medias cañas de tubo de acero inoxidable T-304 para ambos tanques	\$ 1,657.89
21	Transportador helicoidal de 12" de diámetro y 12 m de longitud con base estructural, para alimentación de residuos orgánicos molidos a tanque biorreactor, en acero inoxidable T-304, incluye motorreductor	\$ 27,157.89
22	Transportador helicoidal de 12" de diámetro y 7.8 m de longitud, para distribuir los residuos orgánicos molidos a los dos tanques biorreactores, en acero inoxidable T-304, incluye motorreductor	\$ 16,084.21
23	Compresor de tornillo XV - custom 20 HP, incluye tanque pulmón de 500 litros, mangueras y conexiones	\$ 8,220.00
24	Tractor agrícola marca JOHN DEERE, modelo 5415 DT con creeper, motor de 77 HP 4 cilindros, equipado con cargador 562SL para tractores serie 5000 Sincron, bastidores de montaje, joystick, cucharón de 0.43 m3	\$ 38,894.74
25	Camión de volteo nuevo marca VOLVO de 7 m3, modelo VLN, año 2009	\$ 34,210.53
26	Asesoría en la instalación de equipo, administración, arranque y puesta en marcha del proyecto	\$ 13,200.00
27	Remolque agrícola con tanque de 5000 litros. Ejes tándem cama baja 14000 lbs. Llantas 11 L - 16, tanque negro ROTOPLAS 5000 litros reforzado al 20 %, NOM - 009 STPS - 1994, aprobado por la FDA. Bomba 2 X 2, motor HONDA 4 HP gasolina (o equivalente), y mangueras y conexiones.	\$ 8,400.00
28	Estudio de mecánica de suelos	\$ 4,210.53
29	Obra civil, incluye: nivelación del terreno, retiro de escombros, excavación, colado de zapatas para bodegas, compactación del terreno, construcción de la placa de concreto para tanques biorreactores y plancha de concreto para molinos y el armado de acero necesario	\$ 52,631.58
		SUBTOTAL \$ 753,765.86
	Nota1: el costo de la obra civil puede cambiar según resultados de la mecánica de suelos	16% DE IVA \$ 120,602.54
		TOTAL \$ 874,368.40
	Nota2: los precios están dados en dólares y sujetos a cambio sin previo aviso	10% IMPREVISTOS \$ 87,436.84
		\$ 961,805.24

Figura 7. Estimación de la inversión requerida para la planta de RSU sin utilizar biorreactores. (Elaboración propia).

La segunda opción para la planta de tratamiento de residuos sólidos orgánicos es utilizar un biorreactor aerobio continuo de fermentación acelerada, cuyo escalamiento industrial a partir de las pruebas técnicas del equipo piloto, se pueden ver en la *Figura 8*. La inversión necesaria para esta configuración se puede apreciar en las *Figuras 4a* y *4b* y la respectiva distribución de planta, en la *Figura 5*. Como se puede observar en la distribución de planta, se requieren de 2 biorreactores con un volumen de 350 m³ cada uno, para poder almacenar la materia orgánica generada por el municipio en 15 días (tiempo de residencia para obtener la composta inmadura).

Una vez que se obtiene la composta inmadura (cuyo volumen es aproximadamente la mitad del volumen inicial), se completará el proceso mediante composteo en pila durante 30 días más, haciendo un total de 45 días (mes y medio); por esta razón principalmente, es que se requiere una superficie de terreno mucho menor que sin los biorreactores; esto permitiría dar servicio incluso, a la industria tequilera (bagazo principalmente y vinazas) en forma moderada y a la ganadera (estiércol), que servirían como material estructurante y para humedecer la composta, además de compensar la falta de nitrógeno en la relación C-N necesaria para un buen composteo.

Esta configuración también requiere de una volteadora, pero no autopropulsada, sino que se acoplaría a un tractor que también halaría un remolque con un tinaco con agua para humedecer la composta inmadura; a la vez el tractor está equipado con un cucharón para cargar la composta al camión de volteo.

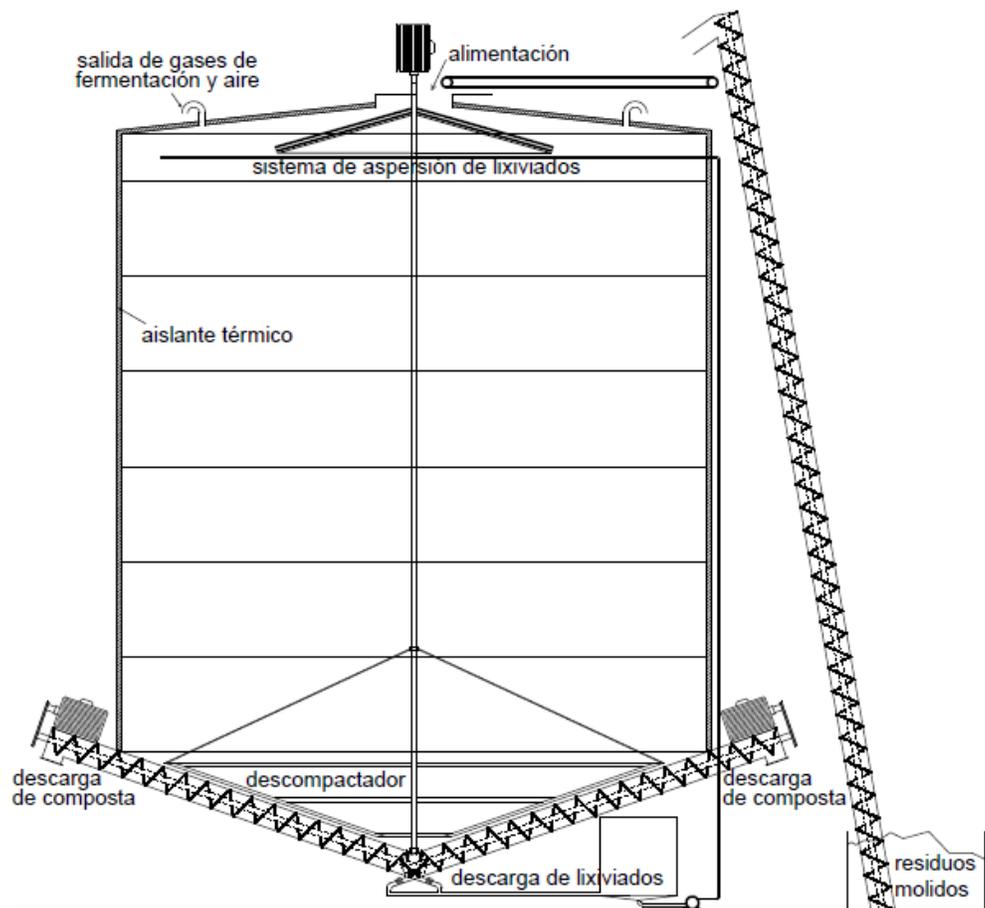


Figura 8. Biorreactor industrial aerobio continuo de fermentación acelerada. (Elaboración propia).

En el caso de las llantas, existen alternativas para molerlas y separar el acero y el caucho, pero la inversión es alta y no es conveniente para la cantidad de llantas que llegan al relleno sanitario. Es mejor almacenarlas y que un tercero se las lleve para su disposición, como actualmente se ha hecho.

CONCLUSIONES

Para la planta de tratamiento de residuos sólidos inorgánicos, es suficiente implementar una banda transportadora a baja velocidad para realizar la clasificación manual de los residuos y emplear a los “pepenadores” (que trabajan actualmente en el relleno sanitario), para dicha tarea. Las botellas de plástico hacen un volumen grande, que se puede reducir significativamente utilizando molinos acondicionados para tal efecto; las botellas de vidrio se quebrarían de forma manual siguiendo una metodología adecuada para evitar accidentes.

Los residuos sanitarios, textiles, madera y algunos plásticos no reciclables, se podrían incinerar para reducir el volumen a cenizas, y aunque el horno incinerador se considera opcional, es deseable su implementación, puesto que ayudaría a incrementar el tiempo de vida útil del relleno sanitario de 6 a 8 veces más el tiempo de vida proyectado que, de lo contrario, solo se podría incrementar de 2 a 3 veces más.

De las dos alternativas que se analizaron (utilizando biorreactores y sin ellos), la mejor alternativa es utilizando biorreactores, puesto que tiene la ventaja de que requiere una cantidad de terreno mucho menor que utilizando únicamente composteo en pila (*Figuras 5 y 6*); si bien la inversión es mayor (una diferencia de \$111,765.27 USD), se compensa con la proyección de crecimiento de la planta de tratamiento de sólidos orgánicos, que podría soportar un incremento hasta del 600% (*Figuras 4a, 4b y 7*).

La implementación de una planta de tratamiento para los residuos sólidos municipales, es deseable, de esta manera se tendría una razón de peso para convencer a la población sobre la separación de los residuos en el hogar y aspirar a un desarrollo sustentable. Esta fue la razón principal del presente proyecto: el hacer un estudio técnico-económico para visualizar la factibilidad de la implementación de una planta de tratamiento de los residuos sólidos municipales, analizando diferentes alternativas.

LITERATURA CITADA

- Barradas, A. (2009). Gestión Integral de residuos sólidos municipales. Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales.
- Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ) (2015). caracterización de los residuos sólidos urbanos del municipio de Arandas, Jalisco.
- Chávez, M. D. R. C., Valdés, D. R., Villa, I. G., & Sánchez, C. L. (2011). Evaluación del proceso de obtención de composta por fermentación aerobia y adición de acelerados biológicos/Evaluation of the process of obtaining compost for aerobic fermentation and addition of biological accelerators. *Revista de Investigaciones Marinas*, 30(1), 79-83.
- Escamilla García, P. E. (2012). Estudio de la factibilidad para la elaboración de composta en la Delegación Milpa Alta (Doctoral dissertation).
- F. Megyesy, E. (2002). Manual de recipientes a presión, diseño y cálculo. Limusa

- Ley de Gestión Integral de los Residuos del Estado de Jalisco, Congreso del Estado de Jalisco; Jalisco, México, febrero de 2007.
- Madrid León, V. E. (2012). Plan de Manejo Integral de Residuos Sólidos del Mercado Central del Cantón Esmeraldas (Bachelor's thesis).
- Marmolejo, L. F., Torres, P., Oviedo, E. R., Bedoya, D. F., Amezcua, C. P., Klinger, R., ... & Díaz, L. F. (2009). Flujo de residuos: Elemento base para la sostenibilidad del aprovechamiento de residuos sólidos municipales. *Ingeniería y Competitividad*, 11(2).
- Negro, M. J., Villa, F., Aibar, J., Aracón, R., Ciria, P., Cristóbal, M. V., ... & Lacasta Dutoit, C. (2000). Producción y gestión del compost.
- Röben, E. (2002). Manual de compostaje para municipios. Loja, Ecuador: DED, Ilustre Municipalidad de Loja, 68.
- Santiago, N., Martínez, E., & Padilla, R. (2017). Estudio del nivel de concientización para la implementación de programa de separación de los residuos sólidos urbanos en el municipio de Arandas, Jalisco. *Revista RA XIMHAI*, volumen 13, número 3, pág. 425 a 438.
- Saña, J., & Soliva, M. (1987). El compostaje: Proceso, sistemas y aplicaciones. 11. Barcelona: Diputació de Barcelona, Servei de Medi Ambient.
- Sinnott, R. K., & Towler, G. P. (2012). Diseño en ingeniería química. Reverté.
- Tejada Cota, D. (2013). Manejo de residuos sólidos urbanos en la ciudad de La Paz, BCS: estrategia para su gestión y recomendaciones para el desarrollo sustentable.

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Campus Arandas y a la presidencia del H. Ayuntamiento Municipal de Arandas, Jalisco 2015-2018 por los apoyos a la presente investigación.

SÍNTESIS CURRICULAR

Norberto Santiago Olivares

Ingeniero Químico Industrial por la Universidad Autónoma de Nayarit. Profesor asociado "B" en el Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Arandas. Vocal del Comité de Investigación del Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica Arandas. Profesor de Ciencias Básicas en el nivel medio superior, en el CONALEP, Plantel Arandas. Ha dirigido proyectos de residencia profesional en las áreas de ingeniería. Correo electrónico: norberto.santiago@arandas.tecmm.edu.mx y nosaol@hotmail.com

Samuel Íñiguez Gómez

Químico Farmacobiólogo por la Universidad de Guadalajara. Profesor de asignatura en el Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Campus Arandas. Estudiante de doctorado en biociencias en el Centro Universitario de los Altos de la Universidad de Guadalajara. Ha dirigido proyectos de innovación en industrias alimentarias así como de residencia profesional en las áreas de ingeniería. Correo electrónico: samuel_capilla@hotmail.com

Javier Isaac Contreras Ochoa

Ingeniero Agroindustrial por la Universidad de Guadalajara. Profesor de asignatura en el Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Campus Arandas. Ha dirigido proyectos de residencia profesional en las áreas de ingeniería. Correo electrónico: isaac.contreras@tecarandas.edu.mx

Guadalupe Jacqueline Hernández Hernández

Alumna de Ingeniería Ambiental en el Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Campus Arandas. Ha participado en verano de investigación en el INIFAP Tepatitlán. Correo electrónico: jacquelinehdzhdz@hotmail.com