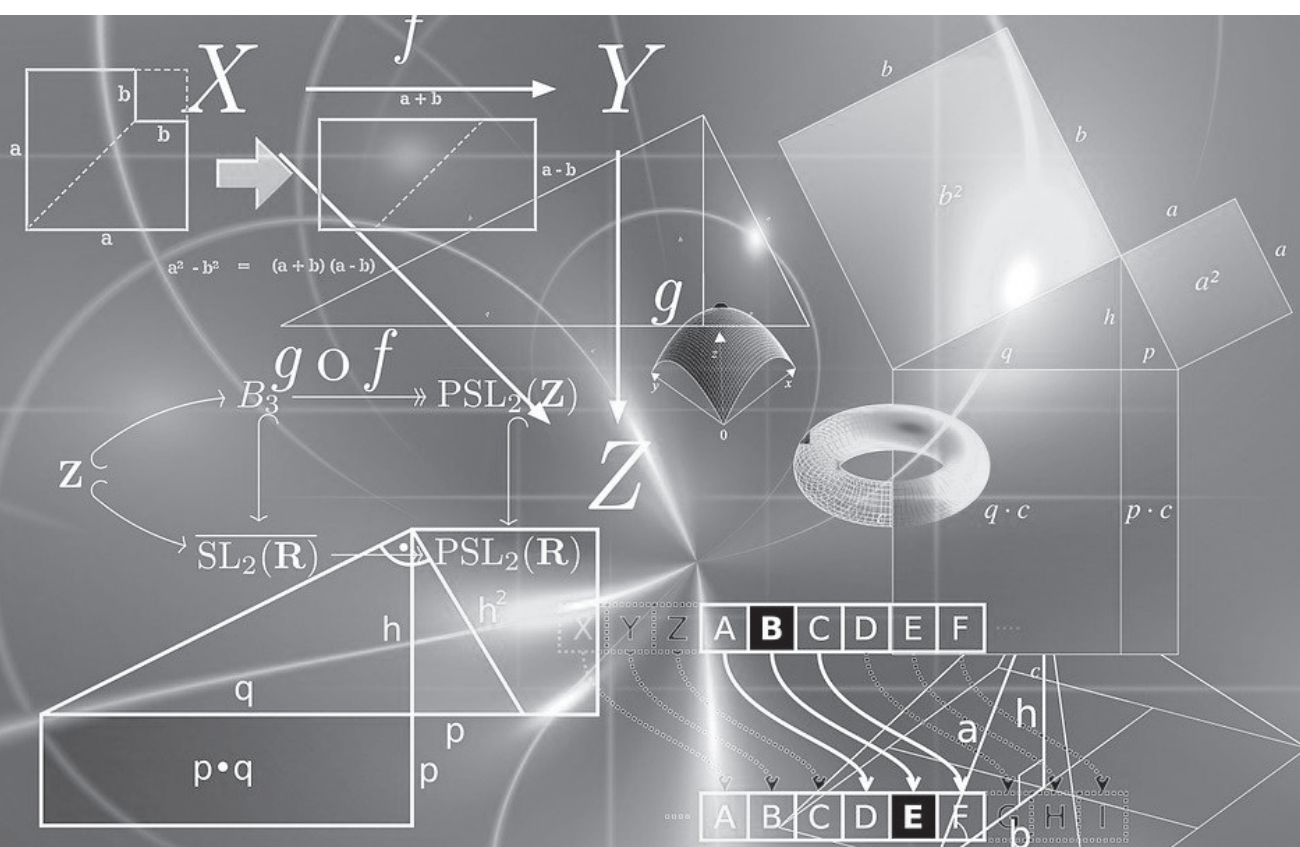


Análisis del aprovechamiento de subproductos con fines energéticos: caso de estudio Aeropuerto José María Córdova

Tatiana Zuluaga¹
David Gálvez²
D. A. Granados³

*Analysis of the use of wastes for energy purposes:
José María Cordova Airport case study*



1 Ingeniera industrial, Grupo GIMU, Universidad Católica de Oriente (Rionegro, Colombia). Correo electrónico: tatiana.zuluaga0955@uco.net.co.

2 Estudiante de Ingeniería Industrial, Grupo GIMU, Universidad Católica de Oriente (Rionegro, Colombia). Correo electrónico: david.galvez5055@uco.net.co.

3 Doctor en Sistemas Energéticos, Grupo GIMU, Universidad Católica de Oriente (Rionegro, Colombia). Correo electrónico: dgranados@uco.edu.co.

Cómo citar este artículo:

Zuluaga, T.; Gálvez, D. & Granados, D. A. (2020). Análisis del aprovechamiento de subproductos con fines energéticos: caso de estudio Aeropuerto José María Córdova. *Revista Universidad Católica de Oriente*, 31(45), 10-27.

Resumen

El presente artículo expone el estudio realizado para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados en los restaurantes del aeropuerto José María Córdova (JMC) en Rionegro (Antioquia) a través de un proceso de torrefacción para la generación de combustibles sólidos. Primero se identificaron los puntos generadores y luego se hizo la separación y caracterización de estos en el centro de acopio según su tipología. Se hizo además un muestreo de los residuos, los cuales fueron secados en un horno industrial. El material fue mezclado y caracterizados antes y después del proceso de torrefacción a través de análisis próximo y análisis elemental, y la obtención del poder calorífico. La torrefacción se realizó a tres temperaturas (220 °C, 250 °C y 280 °C) en atmósfera inerte. Se encontró que se generan aproximadamente 16 toneladas de residuos mensuales en el aeropuerto, y que la humedad es de aproximadamente 76 %, lo que representa una biomasa seca para producción de biocarbón cerca de 3,2 toneladas mensuales. El residuo torrefactado obtuvo un poder calorífico de 24,6 MJ/kg y el rendimiento para el proceso de torrefacción fue de aproximadamente 50 %, lo que indica una obtención total de 1,6 toneladas mensuales de carbón, con una energía de 39,3 GJ, que podrían ser directamente aprovechadas para la cocción de alimentos en los restaurantes del aeropuerto.

Palabras clave

Torrefacción, residuos orgánicos, biocarbón, energía, restaurantes.

Abstract

A study was developed for the use of organic solid wastes generated in restaurants of the José María Córdova Airport (JMC) in Rionegro (Antioquia) through a torrefaction process for solid fuels generation. An identification of the generating points, a separation and characterization of these in the collection center was made by typology. Wastes were sampled and dried in an industrial oven. The material was mixed and characterized before and after torrefaction process through proximate and ultimate analysis, and by High Heating Value (HHV). Torrefaction was carried out at three temperatures (220 °C, 250 °C and 280 °C) in an inert atmosphere. It was found that approximately 16 tons of wastes per month are generated at the airport, with moisture of approximately 76 %, which represents a dry biomass for biocarbon production of 3.2 tons per month. The torrefied solid obtained has a HHV of 24.6 MJ/kg and a Mass Yield of approximately 50 %, indicating a total of 1.6 tons of coal per month, with an energy of 39.3 GJ. This solid fuel could be directly used for cooking in the restaurants of the airport.

Key words

Torrefaction, organic wastes, char, energy, restaurants.

Introducción

Hoy en día una de las principales preocupaciones alrededor del mundo trata sobre las problemáticas energéticas; la mayoría de las investigaciones en temas energéticos están enfocando sus esfuerzos hacia la reducción del impacto ambiental en comparación de la utilización de combustibles fósiles.

Las biomásas son los recursos de origen biológico, como puede ser el vegetal, animal o productos de su transformación, que energéticamente se utilizan para obtener combustibles energéticos, también denominados biocombustibles. La biomasa posee un balance energético muy positivo, ya que la energía neta contenida en ella es superior a la gastada en la obtención del cultivo y en los procesos de obtención de biocombustible. Cuando esta biomasa es tratada en procesos térmicos, las emisiones salientes no son catalogadas como contaminantes (Arévalo, 2014; Romero Salvador, 2010).

En la actualidad los desperdicios de alimentos representan un gran porcentaje en la categoría de residuos generados a nivel mundial. Estos son distinguidos porque tienen un contenido de humedad relativamente alto (más del 70 %); un porcentaje de volatilidad y valor del calentamiento (HHV) bajos, pero son propensos a la descomposición bacteriana. Cuando estos residuos

son sepultados o llevados a la tierra liberan olores tóxicos y desagradables; adicional a la producción de lixiviados y emisiones de gases que causan impactos ambientales altos ocasionando que el efecto invernadero sea inevitable. Los restos de comida son materia orgánica principalmente lignocelulósicos y constituyen un recurso sin explotar para la producción de biocombustibles y productos químicos con aplicaciones de alto valor (Rago, Surroop y Mohee, 2018).

La mayor preocupación por contaminación del aire en Colombia se da en la ciudad de Medellín, que ha alcanzado hasta un 74 % de contaminación en el aire, lo que obliga al departamento de Antioquia a buscar alternativas de soluciones de energía sostenible y renovable. Por supuesto, el aeropuerto internacional JMC desea contribuir y pensar más allá de arrojar desperdicios orgánicos a vertederos y generar nuevas opciones para este tipo de residuos, ya que presentan un potencial energético para ser transformados por procesos térmicos como la torrefacción.

La torrefacción es un método para el mejoramiento de las propiedades de la biomasa como combustible sólido, que consiste en calentar lentamente el material para mejorar su contenido energético, se ha presentado como uno de los elementos constituyentes de la solución para

la implantación de la bioenergía a gran escala. Consiste en un calentamiento lento de la biomasa, entre 10-50 °C/min en una atmósfera inerte en un rango de temperatura entre 200-300 °C. Se produce un producto sólido y uniforme con bajo contenido de humedad y alto poder calorífico, comparado con la biomasa inicial. El calentamiento remueve además nuevas cantidades de agua producto de las reacciones químicas de deshidratación, el cual ocurre por encima de 180 °C, así como la formación de CO y CO₂. A temperaturas entre 180-270 °C tienen lugar una reacción exotérmica, así como le sigue la degradación de la hemicelulosa. La biomasa comienza a tostarse y desprende humedad, CO₂ y grandes cantidades de ácido acético con algunos fenoles, los cuales son de bajo valor energético, lo que permite que el material torrefactado tenga mayor densidad energética y más contenido de carbono en la masa resultante, ya que la masa que libera es considerablemente mayor a la energía que libera, lo que hace que el poder calorífico de la biomasa aumente hasta un 44 % (Bridgeman, Jones, Williams y Waldron, 2010; CORDIS, 2014; Ferro, Soler y Zanzi, 2009; Phanphanich y Mani, 2011).

Metodología

Puntos generadores y determinación de tipología de los residuos

Con el fin de identificar los puntos generadores de residuos orgánicos en el aeropuerto JMC,

concretamente restaurantes, se realizó un recorrido por las instalaciones del aeropuerto con la compañía del personal de aseo y se observó la recolección de estos residuos en cada uno de los sitios. Este recorrido sirvió también para ver la metodología usada para la recolección que se realiza en los restaurantes y la separación de los residuos, según el esquema de reciclaje establecido. Los residuos recolectados en todos los sitios generadores de residuos son llevados a un centro de acopio al interior de las instalaciones del aeropuerto en donde se realiza una separación y clasificación manual de todos ellos.

Bajo los parámetros del RAS 2000 (*Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: Título F. Sistemas de Aseo Urbano.*, 2012) y la guía técnica colombiana (GTC 24 (2009-05-20) Guía para separación en la fuente), se realizó una separación y clasificación de los residuos orgánicos e inorgánicos en el centro de acopio. Esta clasificación se realiza mediante una separación por tipo de residuo orgánico para posteriormente ser pesados por clase, exceptuando las sobras de comida (residuos procesados) y contaminantes de los residuos orgánicos. Posteriormente se toma una muestra homogénea representativa, la cual corresponde a 1/8 de la muestra inicial, que se obtuvo mezclando todos los residuos y seleccionando 1/2 de estos residuos, y se repite este procedimiento hasta lograr 1/8 del residuo inicial. Esta muestra de los residuos puede ser expresada según las expresiones presentadas en la ecuación (1).

$$C_1 = W_s * \frac{1}{2}; C_2 = C_1 * \frac{1}{2}; C_3 = C_2 * \frac{1}{2} \quad (1)$$

En donde W_s representa el peso total de los residuos orgánicos, y C_n representa la muestra seleccionada. De esta forma, la muestra C_3 fue la muestra seleccionada.

Problemáticas y alternativas de aprovechamiento

Con miras al aprovechamiento de estos residuos, se consultó la guía técnica colombiana (GTC 53-7, guía para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos no peligrosos), donde se pre-seleccionaron dos posibles alternativas: el aprovechamiento por medio de compostaje y por medio de un tratamiento termoquímico de una biomasa como es la torrefacción. Con el fin de determinar cuál era la más viable se realizó un perfil estratégico, mirando factores claves del entorno como: dimensión sociocultural, dimensión económica, dimensión tecnológica y dimensión político-legal. En el desarrollo se encontraron 15 problemáticas sobresalientes en la recolección de estos residuos, con las cuales se realiza un análisis por medio de las metodologías de matriz de impacto cruzado y árbol de problemas.

Muestreo

Con el fin de identificar los residuos generados en el aeropuerto JMC se seleccionan aleatoriamente muestras de aproximadamente 250 gr de residuos orgánicos, durante 3 veces al día, de aquellos residuos que son llevados al centro de acopio. Este muestreo fue realizado durante 60 días.

Secado y trituración

Siguiendo las indicaciones del RAS 2000, título f para determinar el contenido de humedad de los residuos orgánicos, se empleó el horno de secado INB 400 de Memmert ubicado en el laboratorio de química de la Universidad Católica del Norte, con una temperatura de 105 °C, con el fin de eliminar el contenido de humedad superficial de las muestras. Este proceso se realizó durante 24h, tiempo en el que el material pierde completamente su humedad. La pérdida de la humedad de las muestras se obtuvo mediante la ecuación (2).

$$\omega = \frac{W_M - W_S}{W_M} \times 100 = \frac{W_w}{W_M} \times 100 \quad (2)$$

Donde: w representa el contenido en la humedad de los residuos sólidos, W_m el peso de la muestra, W_s el peso de la muestra después de secarse a 105 °C, W_w el peso del agua contenida en los residuos sólidos (kg).

El proceso de secado evita la descomposición del material mientras es torrefactado y beneficia el proceso posterior de trituración. La trituración del material se realiza con el fin de homogenizar la muestra y favorece el proceso de torrefacción por el calentamiento de estas partículas pequeñas, las cuales se encuentran sin humedad superficial.

Caracterización de la muestra antes y después del proceso de torrefacción

Para conocer el comportamiento del material en el proceso de torrefacción se realizaron caracterizaciones mediante análisis próximo, último y poder calorífico, bajo las normas ASTM D1762-84, D5373-02 y D5865-04 respectivamente. Parámetros adicionales como el rendimiento másico (M.Y. por sus siglas en inglés) y el rendimiento energético (E.Y. por sus siglas en inglés), definidos según las ecuaciones (3) y (4), fueron utilizados para caracterizar el material antes y después del proceso de torrefacción.

$$MY = \frac{M_{T,daf}}{M_{R,daf}} \quad (3)$$

$$EY = \frac{M_{T,daf} \times HHV_T}{M_{R,daf} \times HHV_R} \quad (4)$$

Los análisis mencionados se realizaron con las muestras sin torrefactar y torrefactadas con el fin de identificar cambios en el material como consecuencia del proceso. Adicionalmente, los volátiles generados por el material fueron caracterizados mediante cromatografía gaseosa. En las pruebas elementales, la muestra es oxidada con un exceso de oxígeno para obtener los productos de combustión: dióxido de carbono, agua, y óxido nítrico; la masa de estos productos permite calcular la composición elemental de la muestra. El análisis próximo admite determinar los contenidos de humedad residual, materia volátil, cenizas, carbono fijo y azufre. El poder calorífico es conseguido con el fin de obtener la información de la energía almacenada en el material antes y después del proceso térmico.

Torrefacción del material orgánico

Las pruebas se realizan en un analizador termogravimétrico TGA-2000 Series Navas Instruments, al cual se le especifican condiciones de operación de velocidad de calentamiento en 5 °C/min; flujo de gas inerte (N₂) en 50 ml/min; temperatura de la etapa de secado en 110 °C durante 30 minutos; y temperatura de la etapa de torrefacción en el valor deseado (220, 250 y 280 °C) durante 60

minutos. La cantidad de muestra que se emplea es de aproximadamente 10 mg, la cual es depositada en una cápsula e introducida al equipo para iniciar el proceso. La biomasa es calentada con condiciones controladas por radiación para generar la degradación del material.

Resultados

Identificación del proceso de recolección de residuos en las instalaciones del aeropuerto JMC y de puntos generadores de los residuos orgánicos

En compañía del personal encargado de la recolección de los residuos sólidos generados en las instalaciones del aeropuerto, se hizo un seguimiento a la ruta diaria de recolección. Este acompañamiento se realizó durante dos semanas, donde se tomaron registros con el fin de capturar la información del lugar, restaurante o cafetería visitada, tipo de residuo recolectado, zona del negocio y cantidad recolectada de dicho residuo. A su vez, se identificó el centro de acopio para la concentración de estos residuos y forma de transporte.

Con base en la ruta de recolección y de la información obtenida se logró identificar los puntos que generan mayor cantidad de residuos orgánicos por piso. En el primer piso la cantidad de residuos orgánicos fueron muy pocos ya que principal fuente de generación de residuos son los baños y oficinas, no obstante, hay dos lugares que sí generan una cantidad considerable de residuos orgánicos: Colombia Tropical y Charcutería Johnny Carl. En el segundo piso se generan muchos residuos, pero estos en su mayoría no son correctamente separados por residuos ordi-

narios y orgánicos, los puntos donde se encuentran más residuos orgánicos son: Intercafé, Santa Elena, Mimo's, Santa Clara, Spirit of St. Louis, Astor, Egapan y Juan Valdez Café. En el tercer piso, al tener varios restaurantes donde se prepara y se sirve la comida, se produce una cantidad considerable de desperdicios orgánicos. Entre los restaurantes generadores se tienen: Piccolo, Beer, Viena, Presto, Charcutería Johnny Carl, J&C Delicias y Kokoriko. Además, se encontraron dos puntos de recolección de residuos de la compañía encargada del aseo.

Determinación de tipología de los residuos

Luego de hacer el recorrido por las instalaciones del aeropuerto se realizó una clasificación de los residuos que son llevados al centro de acopio. La caracterización se hizo separando los residuos en las categorías de orgánico, plástico mezclado, bolsas plásticas, vidrio, metal, *poliboar*, *tetrapak*, papel y cartón, icopor e inservible.

Como principales residuos que conforman los orgánicos se encontró que los de café, cáscaras de frutas, sobras de comida y vegetales son los principales. La densidad promedio para las muestras de residuos caracterizadas fue de aproximadamente 449,3 kg/m³.

Con base en información histórica aportada por la empresa gestidora de los residuos orgánicos del aeropuerto (GreenGroup), acerca de la cantidad de residuos recolectados y clasificados por tipo, se obtuvo un promedio mensual de los datos pertenecientes al año 2018, como se puede observar en la Figura 1.

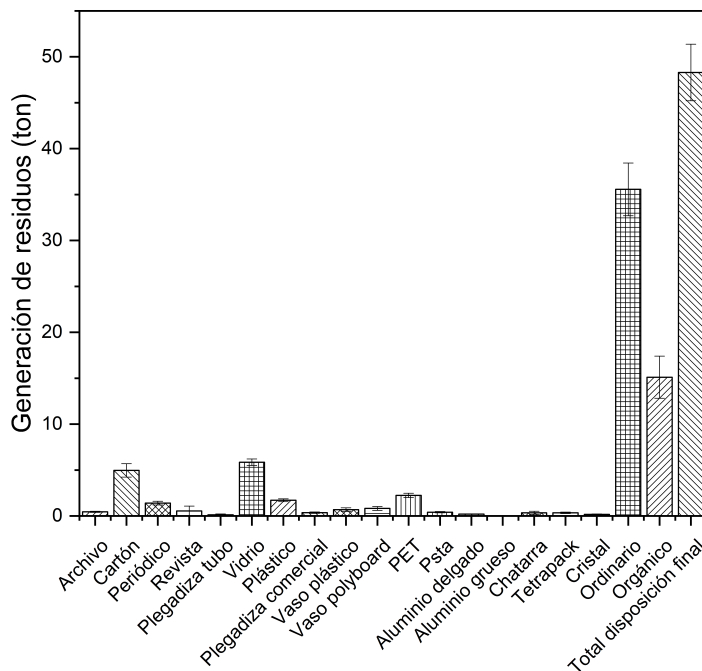


Figura 1. Caracterización de residuos sólidos generados en el aeropuerto JMC. Promedio año 2018 (AIRPLAN, 2017). Fuente: Elaboración propia.

Como se pudo observar en la gráfica anterior, la cantidad de residuos orgánicos generados en el aeropuerto es bastante considerable, cerca de 16 toneladas mensuales en promedio, pero lastimosamente la mayoría de estos no son aprovechados, el 46 % termina en rellenos sanitarios.

Problemáticas generadas y alternativas de aprovechamiento

De acuerdo con la disposición final de los residuos orgánicos identificada en el aeropuerto, los cuales son llevados a rellenos sanitarios y composteras municipales, se hizo un análisis de algunas problemáticas con el fin de detectar

aquellas de mayor incidencia. Las problemáticas identificadas son las siguientes:

1. Llenado exponencial de los rellenos sanitarios.
2. Gases de efecto invernadero generados en el relleno.
3. Escases de energía.
4. Energías contaminantes.
5. No aprovechamiento de los residuos orgánicos.
6. Altos costos de transporte de los residuos.
7. Problemas de sanidad y salud pública cerca del relleno.

8. Inadecuada disposición de los residuos.
9. Contaminación ambiental.
10. Inadecuada separación de los residuos dentro de las instalaciones del aeropuerto.
11. Costos por la utilización del relleno sanitario.
12. En el aeropuerto no hay una caracterización de los residuos orgánicos.
13. Costos de oportunidad por no aprovechamiento de los residuos orgánicos.
14. Problemas de sanidad y salud pública en el centro de acopio del aeropuerto.
15. Generación de vectores en el aeropuerto por inadecuado flujo de los residuos.

Con el fin de detectar las problemáticas de mayor influencia se utiliza la metodología de matriz de impacto cruzado, la cual es una herramienta de planificación que permite observar, mediante un valor numérico, la preponderancia que tiene una de las causas de un problema en la existencia de este. En la matriz de impacto cruzado se tuvieron en cuenta las 15 problemáticas identificadas anteriormente y se obtuvieron los siguientes datos:

- Una de las principales problemáticas es el desaprovechamiento de los residuos orgánicos e inadecuada disposición de los residuos en general, de allí se derivan otros inconvenientes importantes por lo que es urgente la intervención en este aspecto. Esto se evidencia en el alto puntaje obtenido horizontalmente.
- La contaminación ambiental que se genera en rellenos sanitarios y composteras como consecuencia de emisiones de gases

de efecto invernadero como el gas metano, es una de las problemáticas encontradas. Esta es consecuencia de las demás fallas encontradas, como lo demuestra el puntaje alto de manera vertical. Así, la intervención en cualquier ítem mencionado, tendrá consecuencias en este aspecto, acá tratado.

- En la matriz de impacto se evidencia que el costo de oportunidad, aunque no es despreciable, es una problemática independiente por su bajo valor horizontal, por lo cual no se hace necesario abordarla por el momento.

Al realizar el plano de relaciones, presentado en la Figura 2(a), el cual se obtiene al graficar los subtotales por filas y columnas en un plano cartesiano donde las columnas son el eje x (la dependencia) que informa qué tanto ha sido influida por la demás, y las filas el eje y (la motricidad) indican qué tanto influye en las demás; los cuadrantes son separados por el promedio de cada subtotal de filas y columnas de la matriz de impacto. Este plano permite encontrar cuál es problema verdadero, sus causas y consecuencias. El primer cuadrante es zona de conflicto, es la región donde se pueden definir las problemáticas más importantes a solucionar; el segundo cuadrante es zona de poder, allí se muestra cuáles son las alternativas más influyentes y son catalogadas como causas; el tercer cuadrante es zona autónoma, en él se encuentran los problemas más independientes puesto que no influyen ni son influidos; y el cuarto cuadrante es zona de salida, donde se muestran aquellos problemas catalogados como consecuencias.

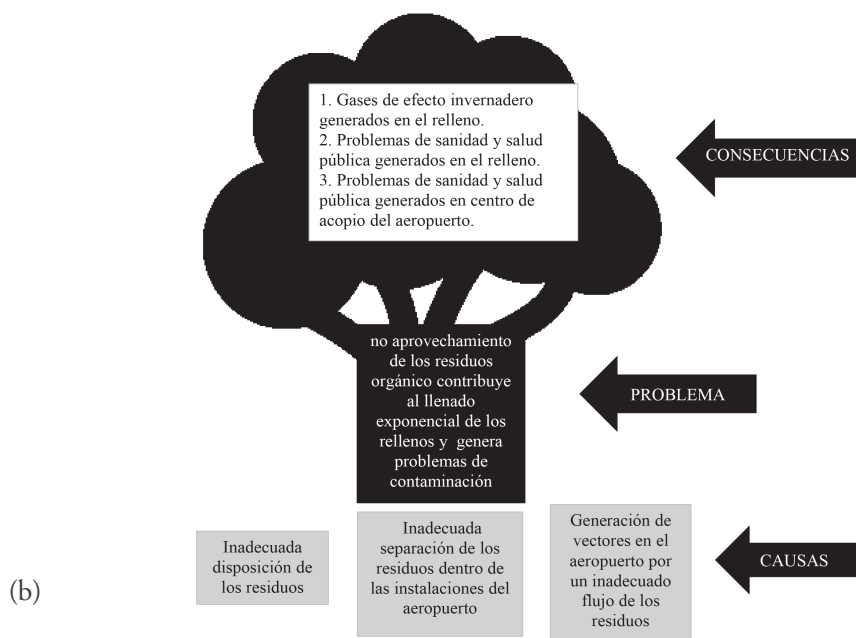
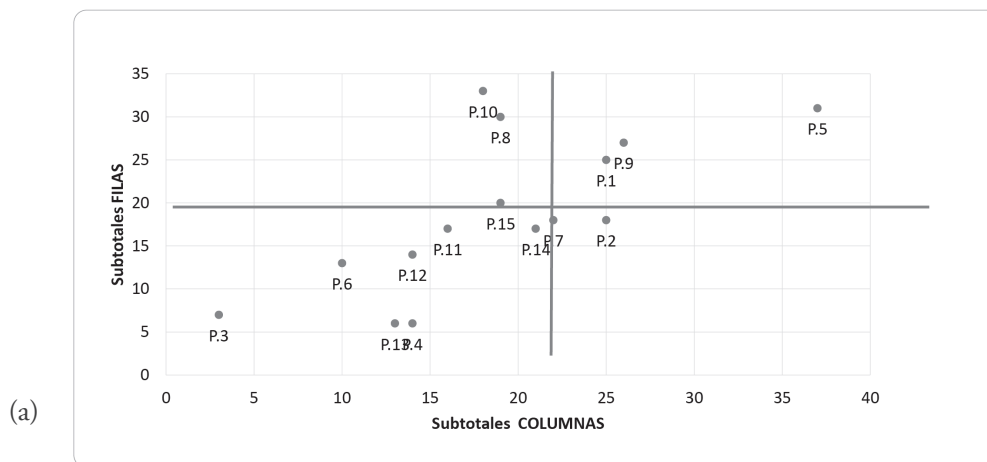


Figura 2. Plano de relaciones de la matriz de impacto cruzado (a); y árbol de problemas (b).

Fuente: Elaboración propia.

A partir de este plano se realizó el árbol de problemas, el cual se puede observar en la Figura 2(b). En él se muestra que para combatir estos problemas principalmente se debe buscar una alternativa de aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en las instalaciones del aeropuerto.

Alternativas de aprovechamiento

Con el fin de evaluar el mejor proceso de aprovechamiento de residuos orgánicos, se consideró el método actual de compostaje y se analizó la opción de convertir estos residuos en combustibles sólidos a través del proceso de torrefacción.

Haciendo este ejercicio con ambas alternativas (Tabla 1), se observaron incidencias en el entorno, a continuación, se muestran algunas:

- Muchas personas buscan empleo por lo cual será fácil encontrar personal para laboral en cualquiera de los métodos de aprovechamiento.
- La inflación en los últimos años ha superado la meta propuesta por el gobierno, lo que no es tan positivo para cualquier economía y esto podría afectar a cualquiera de los dos proyectos.
- Los resultados de la balanza de pagos de 2018, calculados por el Banco de la República, son alentadores, lo cual es positivo; la vulnerabilidad externa de la economía se redujo en el primer semestre, lo cual disminuye y puede ayudar a preservar el grado de inversión en ambos proyectos.
- El aeropuerto JMC está en ampliación y se pronostica un aumento del flujo de pasajeros, lo cual generará un aumento de los residuos orgánicos.
- El gobierno busca que las empresas sean cada vez más sostenibles, que aprovechen sus residuos o subproductos, el compostaje y la torrefacción aparecen como buenas medidas para el aprovechamiento

del residuo generado en los restaurantes, según la GTC 53-7.

- En Colombia cada vez son más las políticas que apoyan la innovación y el desarrollo. El compostaje y la torrefacción pueden aparecer como una fuente de desarrollo en varios sentidos, tanto desde el aprovechamiento de subproductos o residuos como representar una fuente de empleo. La situación política del país respecto a estos dos proyectos es positiva, pues el gobierno actual realiza incentivos para la generación de empresa o proyectos, por lo cual se están creando políticas que permitan la creación o implementación de estas.

Aspectos del entorno que solo inciden en la torrefacción:

- Al ser un proyecto sostenible, la legislación en Colombia lo favorece.
- Es muy positivo en cuanto a los recursos energéticos, puesto que en el proceso se aprovecha la biomasa y se crea una fuente energética, un biocarbón, con un ciclo de contaminación cero, el cual puede llegar a remplazar al carbón mineral.

Aspectos del entorno que solo inciden en el compostaje:

- La comunidad aledaña no aceptará fácilmente la construcción de la compostera por problema como malos olores, lixiviados, gases y vectores generados por el proceso de compostaje, esta situación podría derivar en un conflicto.

Del perfil estratégico y análisis de conveniencia se obtienen unos resultados favorables para el proyecto de torrefacción, ya que dentro del rango de 3-4, el proyecto es catalogado como positivo, por el contrario, el de compostaje nos arroja un puntaje dentro del rango 2-3, donde el proyecto es indiferente. Por lo anterior, la torrefacción se considera como alternativa de energía renovable recomendada.

Tabla 1. Análisis de factores claves para las opciones de compostaje y torrefacción.

| FACTORES CLAVE DEL ENTORNO | | COMPOSTAJE | | | | | TORREFACCION | | | | |
|--|--|------------|-------|------|------|------|--------------|-------|------|------|------|
| | | MN | N | I | P | MP | MN | N | I | P | MP |
| S | Dimensión socio-cultural: | | | | | | | | | | |
| | - Valores y actitudes | | 1 | | | | | | 1 | | |
| | - Grupos Sociales | | 1 | | | | | | | 1 | |
| | - Conflictividad social | | 1 | | | | | | 1 | | |
| | - Mercado de trabajo | | | | | 1 | | | | | 1 |
| E | - Sindicatos | | | 1 | | | | | 1 | | |
| | - Defensa del consumidor | | | 1 | | | | | 1 | | |
| | Dimensión económica | | | | 1 | | | | 1 | | |
| | - PIB | | 1 | | | | | 1 | | | |
| | - Inflación | | 1 | | | | | 1 | | | |
| T | - Paro | | 1 | | | | | | | | |
| | - Balanza de Pagos | | | | 1 | | | | 1 | | |
| | - Productividad | | | | | 1 | | | | 1 | |
| | - Mercado de capitales | | | 1 | | | | 1 | | | |
| | - Recursos energéticos | | | 1 | | | | | | | 1 |
| P | - Política industrial | | | | | 1 | | | | | 1 |
| | Dimensión tecnológica | | | | 1 | | | | 1 | | |
| | - Política I + D | | | | 1 | | | | 1 | | |
| | - Conocimiento científico y tecnológico | | | | 1 | | | | 1 | | |
| | - Infraestructura científico y tecnológico | | | | 1 | | | | 1 | | |
| P | - Madurez tecnologías actuales | | | | | 1 | | | | | 1 |
| | - Disponibilidad nuevas tecnología | | | | | | | 1 | | | |
| | Dimensión político - legal | | | | 1 | | | | 1 | | |
| | - Situación política | | | | 1 | | | | 1 | | |
| | - Política económica | | | | 1 | | | | 1 | | |
| - Legislación económica-social | | 1 | | | | | | 1 | | | |
| - Política fiscal | | | | 1 | | | | | | 1 | |
| MN: Muy Negativo, I: Indiferente, MP: Muy Positivo | | | | | | | | | | | |
| Total calificación | | 0 | 6 | 4 | 8 | 5 | 0 | 2 | 4 | 9 | 7 |
| Porcentajes de calificación | | -30% | -16% | 8% | 16% | 30% | -30% | -16% | 8% | 16% | 30% |
| Porcentajes calificados | | 0.00 | -0.96 | 0.32 | 1.28 | 1.50 | 0.00 | -0.32 | 0.32 | 1.44 | 2.10 |
| Puntaje final | | 2.14 | | | | | 3.54 | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Muestreo

Como se mencionó anteriormente, los residuos orgánicos llevados al centro de acopio del aeropuerto fueron muestreados durante 60 días, obteniendo 3 muestras al día de aproximadamente 250 gramos cada una. Estas muestras recolectadas fueron almacenadas en bolsas selladas con el fin de evitar la descomposición y a su vez introducidas en recipientes sellados, marcados con las fechas de recolección de los residuos, hora y peso de la muestra.

Secado y triturado

Las muestras permanecieron a una temperatura de 105 °C durante 24 horas para que se lograra un secado completo del material. Una vez cumplido este tiempo, las muestras son extraídas del horno, una vez frías, se pesan y se registra esta información con el fin de encontrar la cantidad de humedad del residuo. La humedad promedio obtenida de todas las muestras recolectadas fue de aproximadamente el 76 %. Posteriormente, las muestras fueron almacenadas en bolsas selladas *ziploc* y, a su vez, en un recipiente con sello hermético para evitar el contacto con el ambiente.

Luego de haber secado el material, se realizó un triturado de este en una licuadora industrial con

el fin de obtener tamaños de partícula menores de 2 mm de diámetro. Todo el material fue mezclado para lograr un material homogéneo, posteriormente se le aplicó la técnica del muestreo del cuarteo para seleccionar la muestra que será finalmente procesada mediante el proceso térmico de torrefacción.

Realización del proceso de torrefacción

Como se mencionó anteriormente, el proceso de torrefacción se realizó con tres temperaturas diferentes, las cuales fueron 220 °C, 250 °C y 280 °C con el fin de capturar información en todo el rango del proceso. Durante el proceso, se monitoreó constantemente la masa del material y los volátiles generados tal y como puede ser observado en la Figura 3.

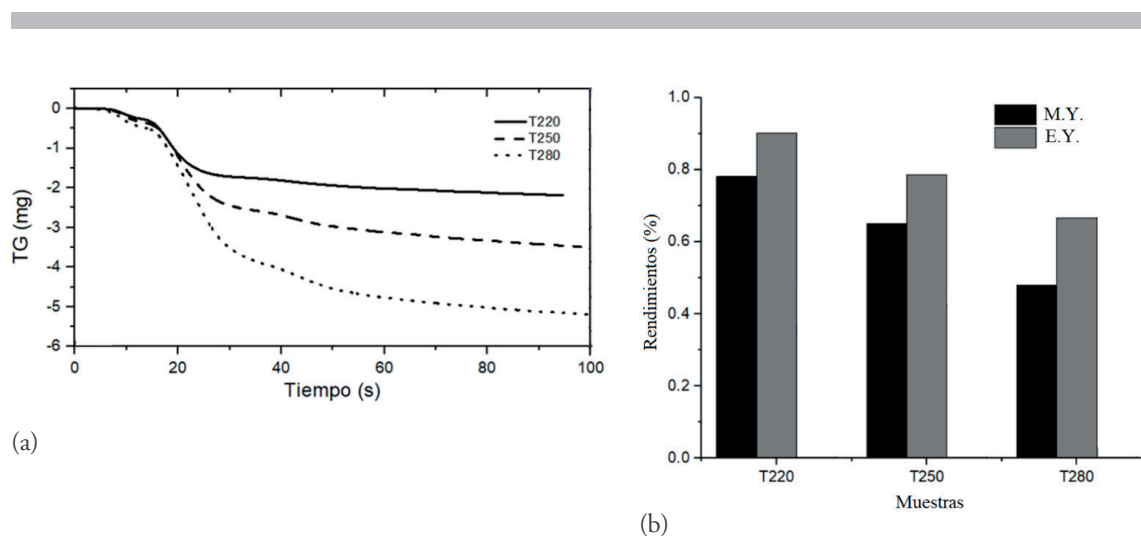


Figura 3. Resultados del proceso de torrefacción. (a). Pérdida de masa de las muestras torrefactadas a diferentes temperaturas; (b). Rendimientos máxicos y energéticos de las muestras torrefactadas.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3 se observa el comportamiento de las muestras del material FW que fueron torrefactadas a diferentes temperaturas. Como se dijo en la metodología, aproximadamente muestras de 10 mg fueron sometidas al proceso térmico, con lo que es posible concluir que para una temperatura de 220 °C, la biomasa pierde aproximadamente el 20 % de su masa en volátiles.

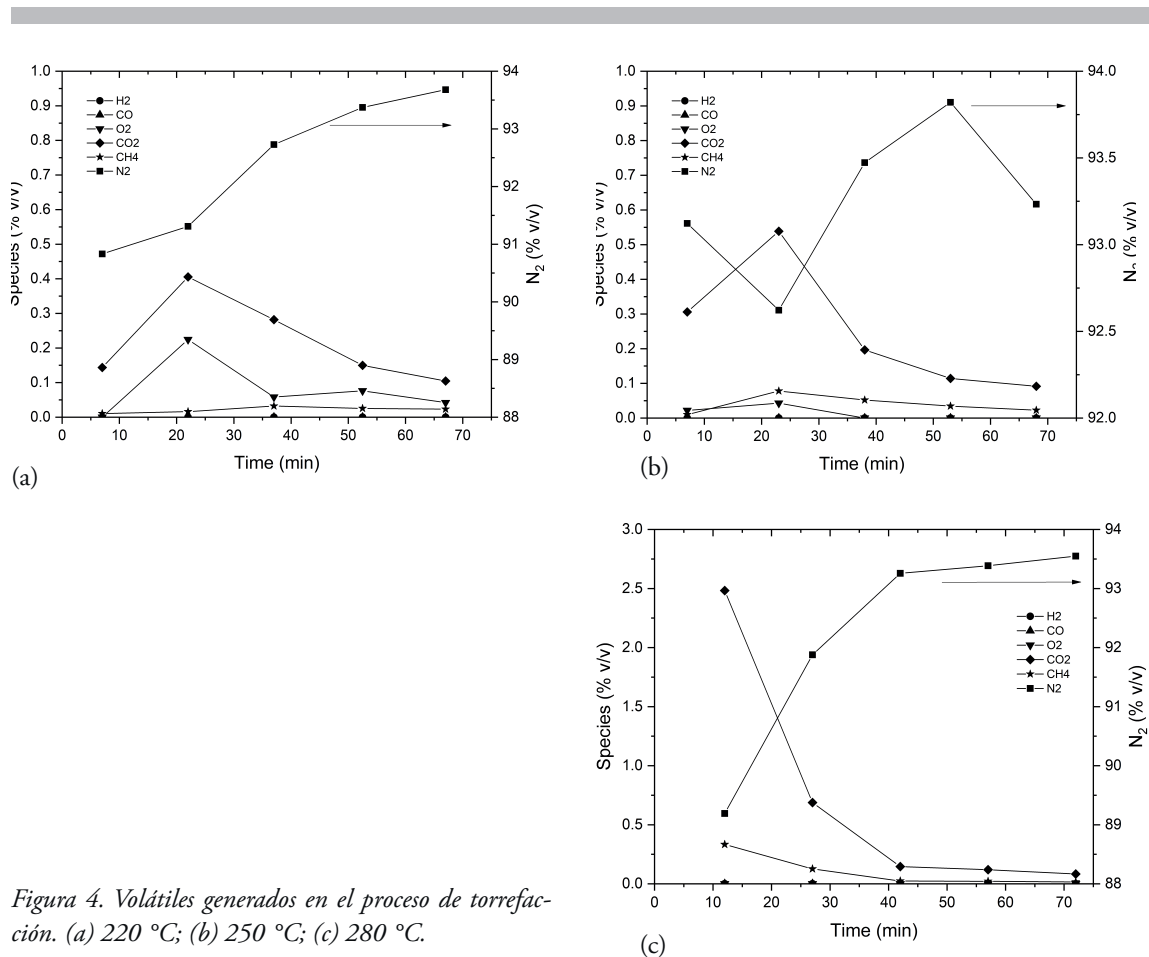


Figura 4. Volátiles generados en el proceso de torrefacción. (a) 220 °C; (b) 250 °C; (c) 280 °C.

Fuente: Elaboración propia.

Para la temperatura de 250 °C la biomasa pierde una masa de aproximadamente 35 % y de 55 % para una temperatura de 280 °C. Esta información al igual que la pérdida de energía para esta masa puede ser entendida a través de los paráme-

tros descritos en las ecuaciones 3 y 4 (Figura 3b). A menor temperatura de proceso, menos masa y energía pierde el material, y cuando la temperatura aumenta, aumentan también las pérdidas de masa y energía. En cada condición térmica, el porcentaje de masa que se pierde es mayor que el porcentaje de energía perdida. Este comportamiento hace que se presente una densificación energética en el material, lo que hace llamativo este proceso térmico.

En la Figura 4 es posible observar la generación de volátiles para diferentes temperaturas del proceso de torrefacción. Cuando la temperatura es baja (Figura 4(a)), los gases detectados, como el caso de CH_4 y CO_2 , en sus bajas cantidades, indican que la biomasa apenas inicia su proceso de descomposición. Las especies detectadas O_2 y N_2 son consecuencia de mala purga del reactor y del

gas inerte alimentado al proceso para garantizar atmósfera inerte. En la Figura 4(b) se observa un aumento en la cantidad de CO_2 generado, respecto al CH_4 , esto indica que las reacciones en la biomasa, principalmente de deshidratación, toman mayor fuerza. Cuando la temperatura es incrementada hasta $280\text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 4c), las reacciones de la biomasa se hacen más considerables y la cantidad de CO_2 generado en el proceso aumenta considerablemente, pasando de valores entre $0,4\text{--}0,6\%$ en volumen, hasta valores de $2,5\%$. Bajo esta condición térmica, todos los componentes internos de la biomasa se encuentran descomponiéndose para formar una estructura carbonosa.

En la Tabla 2 se pueden observar los resultados de las caracterizaciones realizadas al material sin tratar y a todos los materiales tratados.

Tabla 2. Resultados de análisis del material procesado y sin procesar.

| Muestra | Análisis próximo (% db) | | | Análisis último (% daf) | | | | HHV (MJ/kg) |
|------------|-------------------------|--------------|--------|-------------------------|------|------|-------|----------------|
| | Volátiles | Carbono fijo | Ceniza | C | H | N | O | |
| Sin tratar | 75.43 | 19.87 | 4.71 | 44.84 | 5.88 | 1.41 | 47.48 | 17.73 |
| T220 | 69.23 | 25.23 | 5.54 | 51.96 | 6.17 | 1.94 | 39.92 | 20.46 |
| T250 | 65.98 | 28.07 | 5.94 | 54.74 | 6.29 | 2.02 | 36.95 | 21.37 |
| T280 | 53.15 | 38.89 | 7.96 | 63.30 | 5.57 | 2.41 | 28.72 | 24.64 |

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó en la sección de metodología, el análisis último consiste en encontrar la masa de los componentes fundamentales de la biomasa como el caso del hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y carbono (C) en la estructura.

Estas cantidades son importantes en el material ya que dan información de aquellos elementos que aportan a la energía almacenada en el material como el caso del carbono y el hidrógeno. El oxígeno y el nitrógeno son elementos que no aportan a la energía del material, y es posible observar que cuando el material se procesa a mayores temperaturas, el oxígeno disminuye hasta en un 58 %. El caso del carbono es de vital importancia, ya que es el que mayor participación en el poder calorífico tiene, incrementando casi un 42 %.

El análisis próximo permite cuantificar la cantidad de volátiles que se pierden durante el proceso, la cantidad de ceniza y la cantidad de carbono fijo en la estructura del material. Este último es de gran interés al referirse a estructuras de carbono que son fácilmente removibles de la estructura, estables a cambios térmicos. El poder calorífico obtenido deja ver que el material presenta un gran potencial desde el punto de vista energético, ya que aumenta casi en un 40 % su poder calorífico, lo que indica que se obtiene un sólido con mayor densidad energética que el inicial. Según esta información, y teniendo en cuenta la cantidad de residuo seco disponible en el aeropuerto, se tiene una energía de aproximadamente 59 572 MJ/mes.

Conclusiones

De acuerdo con lo expuesto en esta investigación, el aprovechamiento de los residuos orgánicos por medio del proceso de torrefacción parece una tecnología con gran potencial con miras a la sustitución de los combustibles fósiles. Los residuos de restaurantes, a pesar de presentar incrementos interesantes en su poder calorífico, poseen altos porcentajes de humedad que lo hacen poco atractivo para su aprovechamiento. Es interesante de esta manera, la utilización de procesos de secado a partir de energías alternativas, como el secado solar para darle un valor agregado al material y hacerlo más interesante para su aprovechamiento.

Anteriormente cuando se hablaba de la disposición final en los residuos orgánicos solo se pensaba en compostaje o rellenos sanitarios como destino final. Estas disposiciones traen consigo muchos problemas, entre ellos la generación de malos olores y vectores, además de problemas de salud pública por generación de gases de efecto invernadero. De esta forma, el aprovechamiento de los residuos orgánicos por medio de procesos térmicos cobra gran interés.

Referencias bibliográficas

- AIRPLAN. (2017). *Residuos no peligrosos 2017 Aeropuerto JMC*. Rionegro.
- Arévalo, W. (2014). *La biomasa : Una alternativa energética proveniente de la vida misma*.

-
- Bridgeman, T. G., Jones, J. M., Williams, A. y Waldron, D. J. (2010). An investigation of the grindability of two torrefied energy crops. *Fuel*, 89(12), 3911–3918. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.06.043>
- CORDIS. (2014). La torrefacción: la última novedad en la bioenergía. Retrieved from <https://cordis.europa.eu/news/rcn/36589/es>
- Ferro, D., Soler, B. y Zanzi, R. (2009). Torrefacción de biomasa densificada. *Tecnología Química*, XXIX, 180–186.
- Phanphanich, M. y Mani, S. (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102(2), 1246–1253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.028>
- Rago, Y. P., Surroop, D. y Mohee, R. (2018). Assessing the potential of biofuel (biochar) production from food wastes through thermal treatment. *Bioresource Technology*, 248, 258–264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.108>
- Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: Título F. Sistemas de Aseo Urbano.* (2012). Bogotá D.C.
- Romero Salvador, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, 104(2), 331–345.
-