

Valeria Caltzontzin Rabell, Claudia Gutiérrez Antonio y Juan Fernando García Trejo

Alternativas para el aprovechamiento integral de residuos orgánicos

Los residuos orgánicos representan un problema de contaminación, ya que se generan en grandes volúmenes. Si bien pueden aprovecharse mediante diferentes procesos de conversión, el tipo de productos que se obtiene es limitado. En cambio, el uso de biorrefinerías, que incluyan el cultivo de insectos como pretratamiento, permitirá generar una amplia gama de productos de una manera integral.

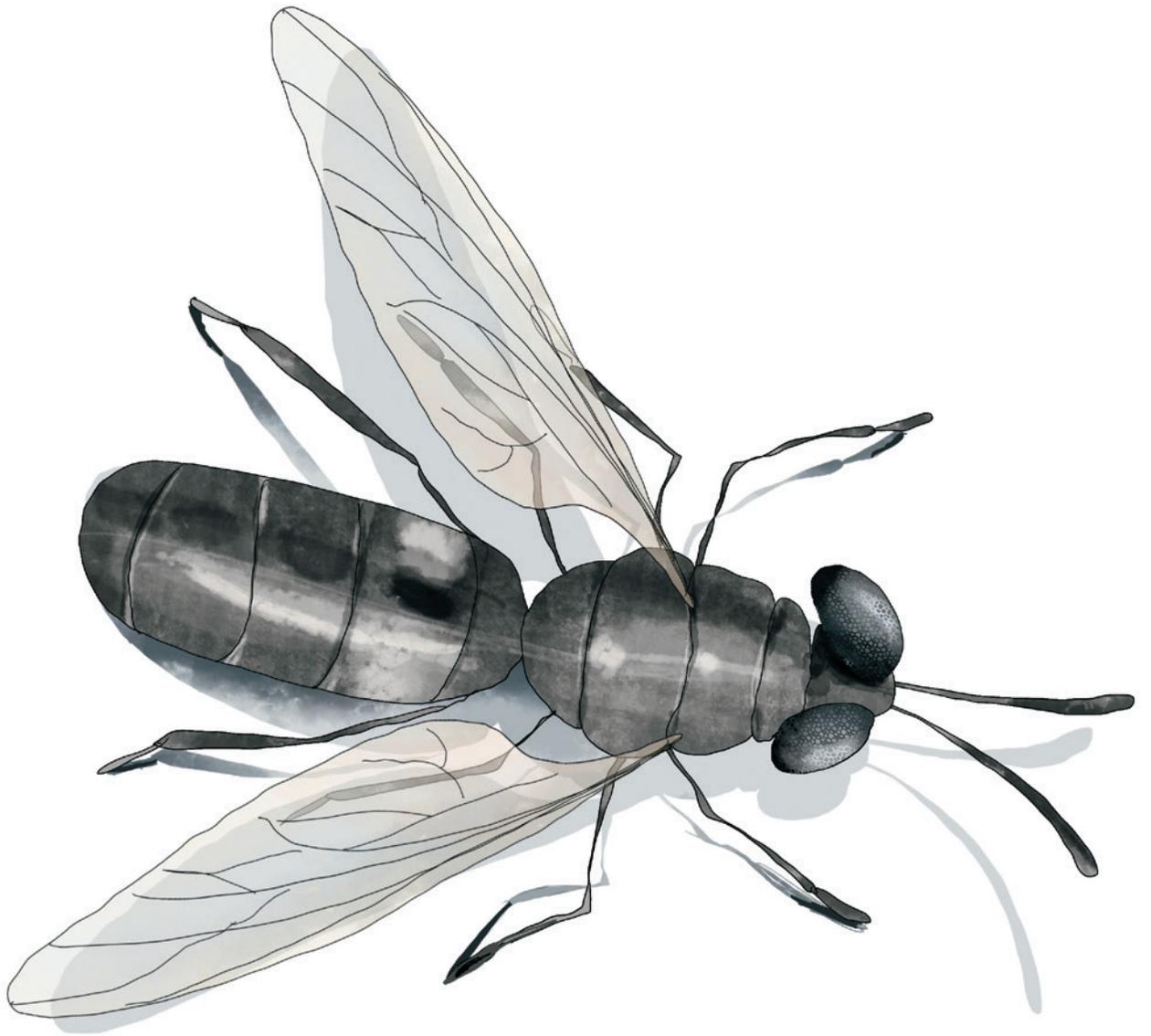
Introducción

¿Qué pasa con toda la comida que no nos comemos? No sólo en casa tiramos alimentos en mal estado o las sobras; esto también sucede en restaurantes, hoteles, hospitales y supermercados. De igual manera, existen mermas cuando se transportan los productos comestibles, ya sea porque se pudren o se dañan. En todos estos escenarios, los residuos se desechan como basura (véase la Figura 1).

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), anualmente se desperdicia un tercio del total de los alimentos producidos en el mundo para el consumo humano; dicha cifra representa 1 300 millones de toneladas, cantidad equivalente a lo que consumen 3 700 millones de personas durante un año. Estos desechos alimentarios forman parte del gru-



Figura 1. Residuos de alimentos.



po de residuos orgánicos, los cuales son materiales o restos de origen vegetal o animal que son fácilmente descompuestos por microorganismos (CCA, 2017).

No obstante, los residuos orgánicos representan un problema porque, aunque existen estrategias para su tratamiento, cada vez se desechan en mayor cantidad. Según la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, tan sólo en México se generaron 38.3 millones de toneladas de residuos orgánicos; de este total, 2.5 millones de toneladas se reutilizaron, lo que indica que casi 94% no se aprovecha para obtener nuevos productos o servicios. Desde el punto de vista económico, las pérdidas cuantificadas en dólares estadounidenses representan 680 000 millones en los países industrializados y 310 000 millones en los países en vías de desarrollo; esta estimación deriva de la generación de residuos por habitante. En América del Norte y Europa la generación de residuos por habitante oscila entre 95 y 115 kg/año, mientras que en África y Asia sólo se generan de 6 a 11 kg/año.

Adicionalmente, la generación de residuos alimenticios se traduce en pérdidas de otros recursos. Por ejemplo, imaginemos que compramos un par de manzanas; al comer una de ellas quedarán como residuos el corazón y las semillas, los cuales también requirieron, para su obtención, recursos como agua, energía, tierra y abono para crecer. Cuando estos residuos se desechan, por decir, en una bolsa, esto implica el uso de otros recursos para la elaboración de la bolsa, así como energía para transportarla al basurero. Ahora bien, si la otra manzana queda olvidada y se descompone, de nuevo se pierden recursos. En ambos casos, cuando los residuos llegan a los vertederos, se descomponen y producen gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono y metano, que contribuyen al calentamiento global.

Por todo lo anteriormente expuesto, la comunidad científica se ha dedicado a buscar alternativas para aprovechar estos residuos mediante diferentes procesos. Así, en este artículo describimos las principales estrategias actuales para la conversión y el aprovechamiento de los residuos orgánicos, así como sus ventajas y desventajas. Por último, presentamos un esquema de biorrefinería, con el cultivo de in-

sectos para el pretratamiento, como una alternativa interesante de revalorización alineada al concepto de economía circular.

■ Estrategias para la conversión de residuos orgánicos

El aprovechamiento de residuos se refiere a los procesos que permiten reincorporar, por lo menos, una parte de los productos a la cadena productiva, mediante su remanufactura, rediseño, reciclado y recuperación de materiales o energía (Semarnat, 2020). La revalorización de residuos orgánicos es una estrategia muy importante para ayudar a resolver el problema de su desecho; al mismo tiempo, permite aprovechar la biomasa para la generación de nuevos recursos energéticos que posibilitarán la transición hacia fuentes renovables de energía; además, otro aspecto que debe tenerse en cuenta es la capacidad de extraer o generar productos de valor agregado a partir de dichos residuos. Para esto, existen procesos térmicos, bioquímicos y biológicos, los cuales describimos a continuación.

Los procesos térmicos se utilizan para transformar los residuos en compuestos diferentes mediante la aplicación de calor; ejemplos de estos procesos son la combustión, la pirólisis y la gasificación. En la combustión, los residuos se queman en presencia de oxígeno, por lo que se genera una flama y calor; la combustión de la biomasa puede alcanzar temperaturas de entre 220 °C y 300 °C, con lo que se libera una gran cantidad de energía (proceso exotérmico). Los productos de la combustión son carbón, dióxido de carbono, agua, cenizas y calor (Guo y cols., 2015). Por otra parte, en la pirólisis, los residuos se descomponen a temperaturas entre 500 °C y 800 °C en ausencia de aire. Los productos de la pirólisis incluyen bioaceite (mezcla de hidrocarburos y otros compuestos), biochar (carbón vegetal), biogases (monóxido de carbono y dióxido de carbono) y agua (Guo y cols., 2015). Por último, la gasificación de los residuos se lleva a cabo a temperaturas mayores de 700 °C, con un flujo de aire menor al requerido en la combustión, para obtener syngas (compuesto por hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de car-

bono); la principal ventaja de la gasificación es que convierte toda la biomasa en combustible sin requerir grandes cantidades de energía (Guo y cols., 2015).

Ahora bien, en los procesos bioquímicos ocurren reacciones químicas derivadas de la acción de ciertos microorganismos. Entre los procesos bioquímicos para el tratamiento de residuos orgánicos se encuentran la fermentación y la digestión anaeróbica. La fermentación consiste en convertir los azúcares simples de los residuos en combustibles, por medio de microorganismos que lo hacen en ausencia de oxígeno. De este proceso se obtiene dióxido de carbono y alcohol etílico (llamado en ocasiones bioetanol), el cual puede utilizarse como aditivo de la gasolina (Guo y cols., 2015), o bien puede tener otros usos, una vez que ha sido purificado. Por otra parte, la digestión anaeróbica consta de una serie de reacciones químicas (acidogénesis, acetogénesis, deshidrogenación y metanogénesis) llevadas a cabo por bacterias especializadas que igualmente degradan los residuos en ausencia de oxígeno. Entre los productos obtenidos se encuentran el biogás y el digestato: el biogás crudo está compuesto principalmente por dióxido de carbono y metano, el cual puede usarse como biocombustible y sustituto del gas natural (Guo y cols., 2015); mientras que el digestato, un sólido que queda después del proceso de digestión, se usa como fertilizante.

Por último, se tienen los procesos biológicos, como el composteo y el tratamiento con insectos.

Mediante el composteo, los residuos se degradan a partir de microorganismos, tanto aerobios como anaerobios (CCA, 2017). Del composteo se obtienen los humus con ácidos húmicos y fúlvicos, que son sustancias asimilables por las plantas y se utilizan como fertilizantes. Por otra parte, en el tratamiento con insectos, los residuos sirven de alimento para que crezcan las larvas, las cuales contienen proteínas y grasas (Rehman y cols., 2017). Por lo general, las larvas consumen al menos 80% de los residuos que se les dan como alimento. Dependiendo de su composición, las larvas pueden utilizarse para alimentar peces, cerdos o gallinas, ya que representan una fuente rica en proteína; también pueden extraerse las grasas para la obtención de biocombustibles; o bien pueden separarse productos de interés como la quitina, que se emplea en el tratamiento de aguas residuales.

Todos los procesos mencionados permiten convertir los residuos orgánicos en diferentes productos, y cada uno tiene ventajas y desventajas (véase la Tabla 1). En general, los procesos térmicos requieren una operación sencilla y permiten generar combustibles o energía; no obstante, los compuestos de valor agregado presentes en los residuos no se aprovechan. En contraparte, los procesos bioquímicos generan principalmente alcoholes que pueden emplearse como aditivos de gasolina o diésel; sin embargo, los costos de operación son elevados y la tasa de conversión de los residuos es baja. Por último, los procesos



Tabla 1. Ventajas y desventajas de los procesos de aprovechamiento de los residuos orgánicos (Guo y cols., 2015; MINENERGIA y cols., 2011; FAO, 2013).

Procesos	Productos	Ventajas	Desventajas
PROCESOS TÉRMICOS			
Combustión	Calor, carbón vegetal y dióxido de carbono	La tecnología es bien conocida; la biomasa se quema casi completamente.	Los compuestos de valor agregado presentes en la biomasa no se aprovechan.
Pirólisis	Biochar, bioaceite y biogases	Los productos se usan como biocombustibles o materias primas para generar otros biocombustibles.	Los equipos operan a altas temperaturas sin oxígeno; los compuestos de valor agregado no se aprovechan.
Gasificación	Syngas	Tiene una alta tasa de conversión de residuos; el syngas puede emplearse para generar otros biocombustibles.	Los equipos operan a temperaturas elevadas; los compuestos de valor agregado no se aprovechan.
PROCESOS BIOQUÍMICOS			
Fermentación	Dióxido de carbono y bioetanol	Se puede utilizar cualquier biomasa fermentable (compuesta por azúcares).	Los costos de procesamiento son elevados por los pretratamientos requeridos y la purificación de los alcoholes.
Digestión anaeróbica	Biogás y digestato	Degradan una gran variedad de residuos, con eficiencias de 90 por ciento.	Los equipos necesarios son de gran tamaño; el biogás obtenido debe purificarse.
PROCESOS BIOLÓGICOS			
Composteo	Humus con ácidos húmicos y fúlvicos	Tecnología sencilla y de fácil manejo; baja inversión que requiere poco espacio.	Requiere una temperatura mínima diaria controlada; tiene un bajo contenido de nitrógeno respecto de los fertilizantes.
Tratamiento con insectos	Biomasa que contiene proteínas, grasas y carbohidratos	Los residuos no requieren pretratamientos; la biomasa generada permite obtener biocombustibles, productos de valor agregado y energía.	Tecnología que aún está en estudio; en especial, para su escalamiento a nivel industrial.

biológicos tienen altos niveles de conversión y permiten obtener biomasa, la cual puede transformarse en diferentes productos.

A partir de la conversión de residuos orgánicos mediante estos procesos es posible obtener productos de valor agregado, biocombustibles y bioenergía; sin embargo, ninguno permite obtenerlos todos a la vez. Si se pudieran convertir los residuos en todos estos productos, se mejoraría la rentabilidad de los procesos de conversión; en este contexto, las biorrefinerías son una estrategia de procesamiento integral, la cual presentamos a continuación.

■ ■ ■ **Biorrefinerías de residuos orgánicos**

■ En una biorrefinería se transforma la biomasa (residuos orgánicos) en múltiples productos de valor agregado, biocombustibles y bioenergía, por medio

de diversos procesos de conversión (véase la Figura 2); este concepto de procesamiento es análogo a la refinería de petróleo, donde se obtienen múltiples productos (gasolina, diésel y gas natural) a partir de una única materia prima (petróleo).

Para clarificar la diferencia entre una biorrefinería y los procesos de conversión individuales descritos arriba, imaginemos que tenemos como residuo una mazorca de maíz en proceso de descomposición. Si este residuo se quema (combustión), se convierte en energía calorífica, gases de combustión y cenizas; pero si se gasifica, entonces se puede obtener syngas; o bien el residuo puede fermentarse para obtener alcohol etílico y dióxido de carbono. Es decir, a pesar de ser el mismo residuo, los productos difieren dependiendo del proceso de conversión empleado, y no es posible obtener productos de valor agregado, biocombustibles o bioenergía al mismo tiempo con un



Figura 2. Esquema de una biorrefinería.

sólo proceso. En contraparte, en una biorrefinería, dicho residuo sería fraccionado en granos de maíz, hojas y olote de la mazorca. Las hojas y los olotes podrían quemarse (combustión) para generar energía calorífica, mientras que de los granos de maíz se podrían extraer compuestos antioxidantes (benéficos para la salud), y posteriormente serían fermentados para obtener alcohol etílico y dióxido de carbono. De esta manera, la conversión del residuo mediante una biorrefinería permite generar productos de valor agregado (antioxidantes), biocombustibles (bioetanol) y energía calorífica en el mismo esquema de procesamiento. En ello radica la importancia de las biorrefinerías como estrategia integral de revalorización de los residuos.

El concepto de procesamiento mediante un esquema de biorrefinería se ha propuesto para algunas especies cultivables, como la *Jatropha curcas*. Sin embargo, la conversión de los residuos orgánicos ha cobrado mayor relevancia para solucionar el problema de contaminación asociado con la acumulación de grandes volúmenes, por lo que se han implementado biorrefinerías para la conversión de residuos alimentarios, así como para el procesamiento del mango y el agave; en estas biorrefinerías se han obtenido biocombustibles, fenoles, fertilizantes, pectinas, entre otros productos (Arora y cols., 2018; Díaz-Jiménez y cols., 2019). No obstante, en estas biorrefinerías se emplean tecnologías con bajas eficiencias, como en el caso de la fermentación, y con altos consumos de

energía, como en la pirólisis. Si bien estas biorrefinerías posibilitan la obtención de productos de valor agregado, biocombustibles y energía, su rentabilidad financiera podría mejorar con el uso de pretratamientos biológicos, como el cultivo de insectos, ya que las eficiencias de conversión son muy altas. En particular, el cultivo de la mosca soldado (*Hermetia illucens*) ha ganado la atención de la comunidad científica por su capacidad para degradar una amplia variedad de residuos.

La mosca soldado es más grande que la mosca común, y sus larvas llegan a pesar 0.2 g (véase la Figura 3). Esta especie habita en regiones tropicales y subtropicales; por ello, su cultivo requiere una temperatura de 24 °C a 30 °C y una humedad entre 60%

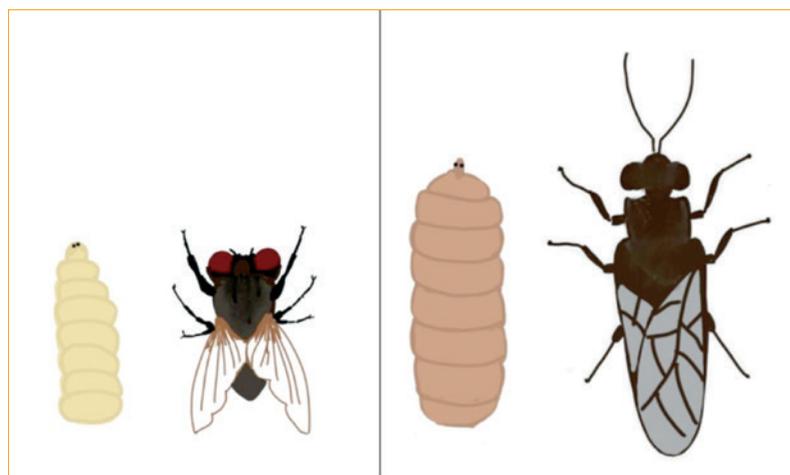


Figura 3. Larva y adulto de la mosca común, *Musca domestica* (izquierda), y mosca soldado, *Hermetia illucens* (derecha).



y 90%. Del cultivo de este insecto se emplean las larvas, ya que contienen gran cantidad de proteínas (35%) y grasas (30%); las proteínas pueden usarse para elaborar alimento para peces y gallinas, aunque a la fecha no existen estudios sobre el impacto en la salud humana por el consumo de pescado o pollo con este tipo de alimentación; por otra parte, con las grasas se puede producir biodiésel o bioturbosina. Entre las ventajas de la mosca soldado destaca que su cultivo no requiere tecnología especial y permite reducir los residuos hasta 80%. Además, se ha observado que las larvas inactivan algunas bacterias transmisoras de enfermedades, como *Salmonella spp.*, y el residuo que queda después de la degradación puede ser utilizado como composta; este residuo se separa manualmente de las larvas. Por todo lo anterior, es deseable que las biorrefinerías utilicen el cultivo de insectos como pretratamiento para la conversión de residuos.

Cabe añadir que el uso de estas biorrefinerías genera beneficios ambientales y económicos, y está alineado al concepto de economía circular. En la actualidad, el modelo de la economía es lineal, lo que implica la obtención de la materia prima, la creación de los productos y el consumo de éstos, para finalmente terminar con el desecho de los residuos. Aunque este modelo ha sido viable, actualmente ya no es sostenible debido a la abundante generación de residuos, el uso intensivo de recursos no renovables para producir energía, y las grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello, se propone un modelo de economía

circular (véase la Figura 4) en el cual se evite el uso exclusivo de recursos naturales como materia prima y puedan reutilizarse los residuos de manera más eficiente. ¿Cómo funciona esto? Así como en el ciclo del agua y los nutrientes, algunos desechos de una fase se convierten en los recursos de la siguiente, la economía circular propone usar los residuos como materia prima para generar otros productos; de esta manera se crea un círculo. Un estudio realizado en siete naciones europeas mostró que el cambio de una economía lineal a una circular puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta 70%, además de generar empleos, mejorar la competitividad y disminuir la cantidad de residuos, así como el uso de recursos no renovables (Stahel, 2016). En el procesamiento de los residuos mediante una biorrefinería, los subproductos de un proceso

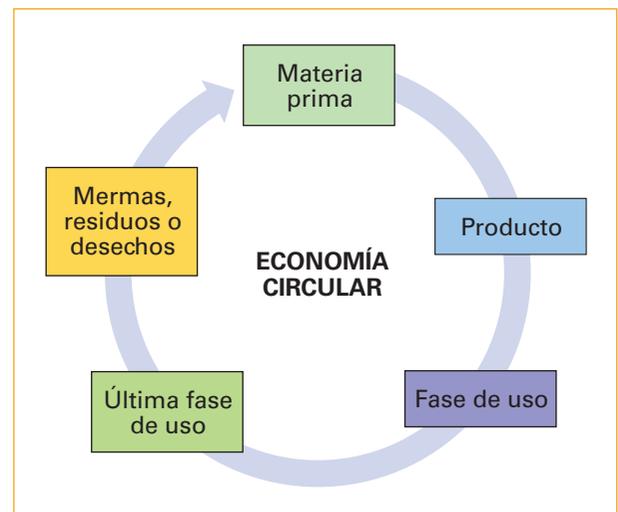


Figura 4. Diagrama de una economía circular.

pueden emplearse en otro; esto ayuda a minimizar los residuos y los costos de producción, así como el impacto ambiental.

■ Conclusión

■ Los residuos de alimentos se generan en grandes cantidades, por lo que se requieren procesos para su aprovechamiento que sean eficientes, de bajo costo y amigables con el ambiente. En este contexto, las biorrefinerías son una alternativa promisoría para la conversión de residuos, dado que posibilitan la generación de productos de alto valor agregado, biocombustibles y bioenergía, en el mismo esquema de procesamiento. En aras de que las biorrefinerías sean rentables, el pretratamiento con insectos, en especial con la mosca soldado, resulta altamente eficiente para la generación de biomasa que puede convertirse en una amplia gama de productos. Por ello, es necesario enfocar los esfuerzos de la investigación para la conversión de residuos mediante biorrefinerías que incluyan el cultivo de insectos, con lo cual se impulsará el establecimiento de una economía circular que aporte beneficios económicos y ambientales a la sociedad.

Valeria Caltzontzin Rabell

Universidad Autónoma de Querétaro.
valeria.caltzontzinrabell@gmail.com

Claudia Gutiérrez Antonio

Universidad Autónoma de Querétaro.
claudia.gutierrez@uaq.mx

Juan Fernando García Trejo

Universidad Autónoma de Querétaro.
juanfernando77@gmail.com

Referencias específicas

- Arora, A. *et al.* (2018), "Process design and techno-economic analysis of an integrated mango processing waste biorefinery", *Industrial Crops and Products*, 116:24-34.
- CCA (2017), *Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte, informe sintético*, Montreal, Comisión para la Cooperación Ambiental.
- Díaz-Jiménez, L. *et al.* (2019), "Conceptualization of a biorefinery for guishe revalorization", *Industrial Crops & Products*, 138:111441.
- FAO (2011), *Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention*, Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/a-i2697e.pdf>>, consultado el 4 de mayo de 2020.
- FAO (2013), *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*, Santiago de Chile, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>>, consultado el 28 de febrero de 2020.
- Guo, M. *et al.* (2015), "Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42:712-725.
- MINENERGIA, PNUD, FAO y GEF (2011), *Manual de biogás*, Santiago de Chile, Ministerio de Energía/Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo/Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura/Global Environment Facility. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>>, consultado el 25 de febrero de 2020.
- Rehman, K. *et al.* (2017), "Conversion of mixtures of dairy manure and soybean curd residue by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.)", *Journal of Cleaner Production*, 154:366-373.
- Semarnat (2020), "Glosario", *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Disponible en: <http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_GLOS_RSM&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce>, consultado el 28 de febrero de 2020.
- Stahel, W. R. (2016), "Circular economy", *Nature*, 531: 435-438.