

Rogelio Ochoa-Barragán, Aurora del Carmen Munguía-López y José María Ponce-Ortega



# La gestión de residuos después del covid-19

La gestión de residuos es uno de los principales retos de los grandes centros urbanos y la pandemia de covid-19 no ha hecho más que agravar el problema; sin embargo, la mejor manera de abordarlo es a través de la revalorización de distintos tipos de residuos, realizando una planificación óptima que permita identificar las mejores tecnologías y productos para implementar un parque industrial que minimice el impacto ambiental y social, donde se impulse el reciclaje mediante impuestos verdes. En este trabajo se discuten y presentan diversas alternativas para un manejo óptimo de los residuos sólidos.

## Introducción

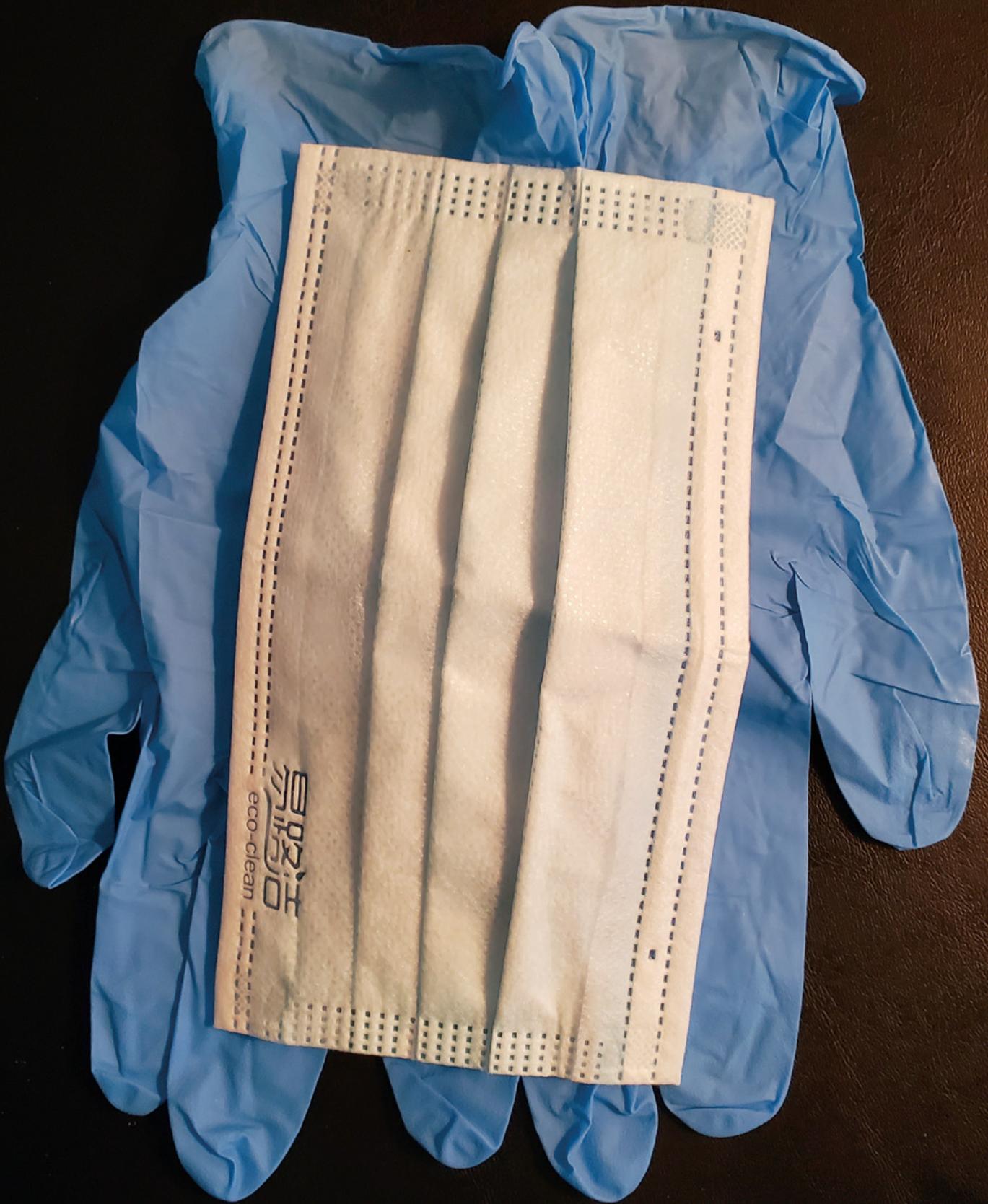
A parte de los problemas causados por la pandemia de covid-19, también hubo efectos positivos en el medio ambiente, como una mejor calidad del aire durante la cuarentena, e incluso grandes avances tanto en el desarrollo de vacunas como de tecnologías para el trabajo a distancia. Sin embargo, uno de los principales problemas de la pandemia ha sido el aumento de la generación de diferentes tipos de desechos (principalmente médicos). Este tipo de residuos representa un riesgo potencial para la salud de los recolectores de basura, el personal sanitario, los pacientes y el público en general.

La gestión de desechos sólidos ya era un problema incluso antes de la pandemia, especialmente en los países en desarrollo, debido a la falta de infraestructura para el procesamiento de desechos. El riesgo existente por una mala gestión de los residuos es tan alto que se estima que, a nivel mundial, aproximadamente 9.2 millones de personas fallecen anualmente debido a este problema (The Daily Star, 2021).



## Modelos matemáticos y estrategias para el manejo de residuos

Durante las últimas décadas se han explorado diversas alternativas para gestionar los residuos sólidos urbanos (RSU), donde la conversión de estos residuos en



易路活  
eco-clean

**Pirólisis**

Proceso térmico que descompone materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo productos gaseosos, líquidos y sólidos.

energía a través de tecnologías como la gasificación, **pirólisis** e incineración se ha convertido en tendencia. Es fundamental destacar que no todos los tipos de residuos son adecuados para este proceso. Por ejemplo, los residuos metálicos tienen un alto valor económico debido a los derivados que pueden obtenerse. Sin embargo, a pesar de la amplia gama de tecnologías disponibles, las tasas de reciclaje continúan siendo bajas en muchas regiones, incluyendo México, donde sólo se recicla el 9.6% de los residuos generados. En comparación, en países como Estados Unidos, donde la producción de residuos es sustancialmente mayor, se logra un 35% de reciclaje.

Para fomentar el reciclaje y maximizar los beneficios económicos, se han propuesto diversas estrategias políticas y financieras. Por ejemplo, Ko y cols. (2020) desarrollaron una estrategia basada en la implementación de “impuestos verdes” en un escenario hipotético en Corea del Sur. Este enfoque plantea el desafío de encontrar la tasa de impuestos óptima que promueva el reciclaje sin generar desaprobación social. Por otro lado, Santibáñez-Aguilar y cols. (2013) presentaron una estrategia de optimización para el reciclaje sostenible de RSU; se observó, sin embargo, un rechazo en el reciclaje de ciertos tipos de residuos, como el vidrio, debido a los altos costos asociados a la separación y transporte.

Estas estrategias se alinean con el enfoque de intensificación de procesos que busca maximizar el

rendimiento y los beneficios económicos utilizando materias primas naturales o residuales. En este contexto, la creación de un parque industrial especializado en el procesamiento de RSU podría potenciar este enfoque (Fernández Rivas y cols., 2018), lo cual podría resultar especialmente útil para residuos con bajo potencial económico.

**Cadena de suministro circular**

Comúnmente, el manejo de residuos comprende diferentes tipos y subtipos de éstos, así como diferentes tecnologías para cada tipo de procesamiento, motivo por el cual las plantas de procesamiento de residuos suelen estar en distintas ubicaciones, incluso en regiones distintas al lugar generador del residuo, lo que provoca que los beneficios logrados no sean observables en la región de origen. Evidentemente, los centros urbanos son los grandes generadores de residuos y bajo la estrategia presentada pueden actuar como consumidores de nuevos materiales y recursos energéticos generados en el proceso del reciclaje de sus mismos residuos procesados en un parque industrial dentro de su misma región, dando lugar a un cambio en la cadena de suministro, de lineal a circular, mejorando así la eficiencia del uso de los residuos, lo cual es parte justamente del concepto de economía circular.

**Parque industrial**

La asignación geográfica del parque industrial es esencial, pues algunos tipos de residuos tienen un bajo potencial económico, como el vidrio, que debido a lo delicado de su manipulación —se fragmenta con facilidad—, resultan caros su separación y transporte, sobre todo si lo comparamos con los precios de venta de sus derivados, pues la separación de residuos representa uno de los mayores costos de todo el proceso. El sistema propuesto cuenta con dos rellenos sanitarios. En el primero se envían residuos de cualquier tipo que no puedan ser procesados, excepto residuos médicos que deben ser enviados a un relleno sanitario especial, debido al alto riesgo para la salud que representa esta clase de residuos (como





Figura 1. Estrategia propuesta para el manejo de residuos sólidos urbanos.

los generados durante la pandemia de covid-19). La eliminación de residuos en vertederos es económicamente barata, pero el costo ambiental es alto. Por tanto, para evitar el envío de grandes cantidades de residuos a estos vertederos, se propone un impuesto variable en función de las cantidades de residuos que se envíen a los vertederos (véase la Figura 1).

### ¿Qué tecnologías utilizar?

La formulación del modelo matemático utiliza parámetros que permiten seleccionar un proceso sobre otro cuando existe más de una alternativa para el tratamiento de un tipo de residuo empleando

disyunciones lógicas, por lo que el modelo es alimentado con un conjunto de parámetros inherentes a los costos de inversión de cada tecnología y sus respectivas eficiencias en el procesado de residuos. El uso de una tecnología u otra depende del objetivo a lograr, ya sea económico, social o ambiental; luego, el modelo selecciona y asigna las respectivas capacidades de procesamiento en función del objetivo propuesto (véase la Figura 2).

### Tasa de impuestos variable

La construcción de un parque industrial capaz de procesar el 100% de los residuos generados en ciu-

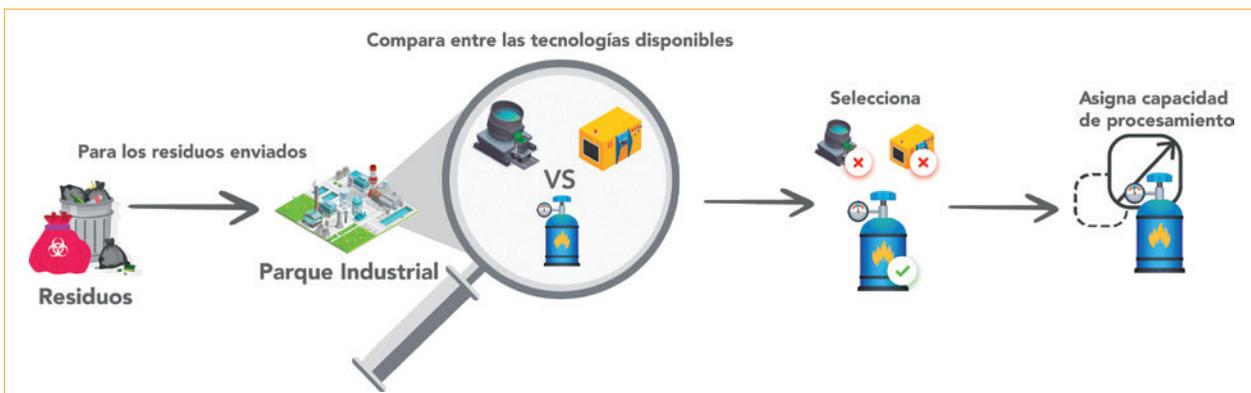


Figura 2. Esquema propuesto para la selección de tecnologías.



dades grandes es complicada, ya que los costos de inversión y las capacidades de procesamiento resultarían extremadamente grandes, por lo que, como se mencionó antes, la incorporación de impuestos verdes promueve el procesamiento de residuos con bajo potencial económico, generando un mayor beneficio ambiental y social. Sin embargo, encontrar un valor adecuado para esta tasa de impuestos puede resultar complicado. Por tal razón en esta estrategia se propone asignar distintas tasas de impuestos en función de las cantidades que son enviadas al vertedero, donde la mayor tasa de impuestos genere un rechazo social, mientras que la menor genere una mayor aceptación social, con el fin de mantener en

un nivel bajo la cantidad de residuos enviados al relleno sanitario (véase la **Figura 3**).

■ **Caso de estudio**

El caso de estudio seleccionado para la aplicación de la estrategia propuesta es la ciudad de Nueva York, donde se propone la construcción del parque industrial en la región de Staten Island. Nueva York es una de las ciudades que más residuos genera en Estados Unidos; además de que ha sido una de las más afectadas por el covid-19 y la generación de residuos médicos desde el inicio del brote. En los Estados Unidos se generan 2.5 kilogramos de desechos médicos por cama hospitalaria todos los días. Durante la pandemia de covid-19, la mayor demanda de artículos médicos, como cubrebocas, batas y gafas, junto con la basura doméstica generada por cama de paciente —también altamente infecciosa—, resultó en un aumento importante de los desechos médicos. El volumen de desechos médicos presentó aumentos exponenciales y la capacidad de almacenamiento de residuos de los hospitales se vio ampliamente rebasada. En la ciudad de Nueva York existen actualmente nueve centros de eliminación de desechos médicos con una capacidad de eliminación estimada de 12 000 toneladas por año, y el 60% de la capacidad se utilizó para tratar desechos médicos altamente contagiosos generados por el covid-19 (Mei y cols., 2021).



**Figura 3.** Esquema propuesto para la selección de la tasa de impuestos.

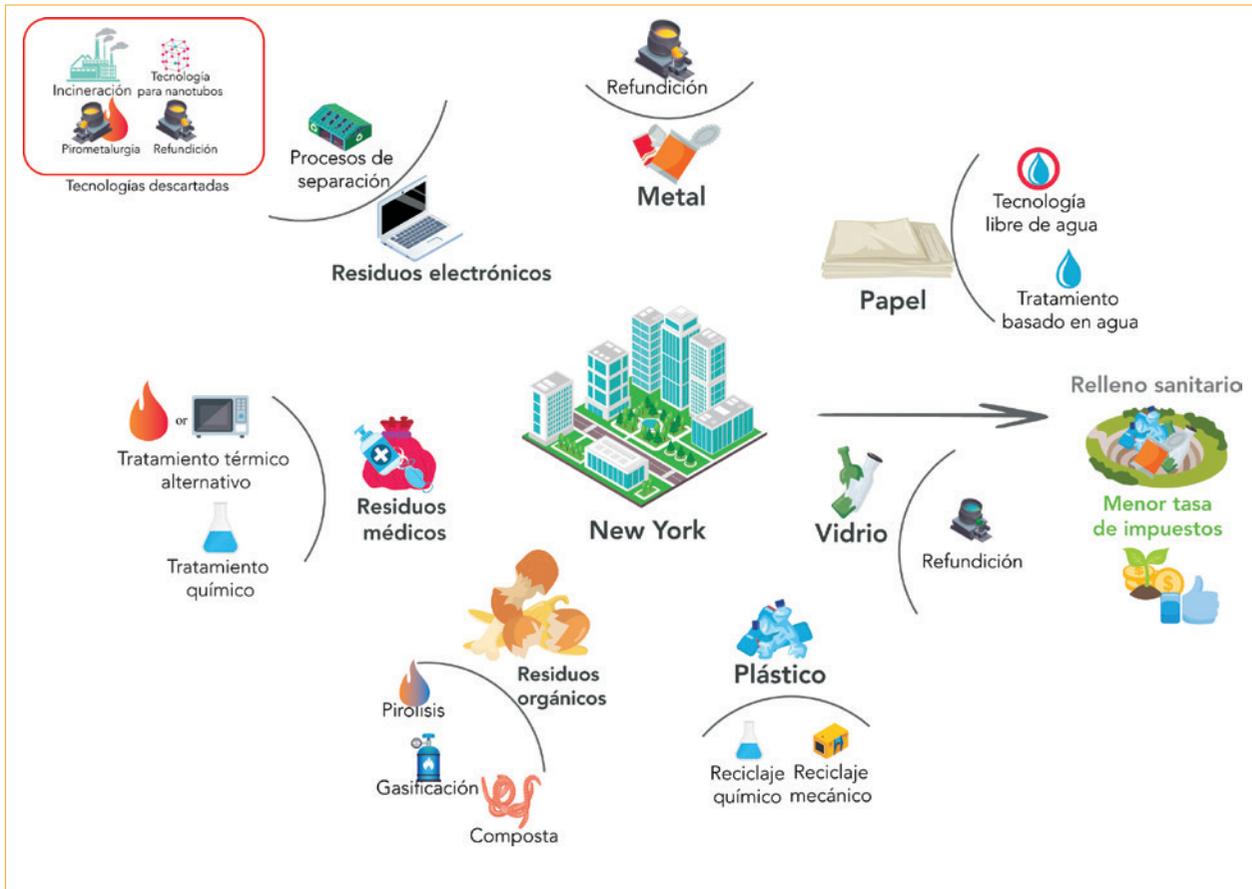


Figura 4. Solución óptima para el caso de estudio de la ciudad de Nueva York.

## Resultados

La solución óptima empleando la estrategia propuesta mantiene un nivel en la menor tasa de impuestos propuesta de 2 USD/tonelada. En esta solución, menos de la mitad de los residuos son enviados al relleno sanitario, y las capacidades de procesamiento no producen enormes costos de inversión. Para mantener el impuesto en el nivel más bajo, se propone una tasa de impuestos mayor que promueva el reciclaje: de 5.1 USD/tonelada, según propuesta de Munguía-López y cols. (2020). En esta solución se envía cerca del 35% de la basura generada al relleno sanitario; sin embargo, es económicamente viable, ya que genera utilidades.

En comparación, Santibáñez-Aguilar y cols. (2013) propusieron una estrategia de optimización donde las diferentes instalaciones de procesamiento se ubicaron en diferentes ciudades. Por tanto, las distancias entre instalaciones en algunos casos resulta-

ron especialmente grandes, lo que provocó que algunos residuos, como el vidrio, no fueran convenientes de reciclar, ya que los costos de separación y transporte superaban los posibles ingresos que se obtendrían por reciclarlos, por lo que la construcción de un parque industrial muestra mejores resultados. La implementación de una tasa de impuestos variable permitió mantener una baja presencia de residuos con bajo potencial económico en los vertederos, así como de los residuos que representan un alto nivel de riesgo ambiental y social, como los residuos médicos generados a raíz del combate contra la pandemia de covid-19. De la amplia gama de tecnologías dispuestas, se seleccionaron principalmente aquellas que presentan un balance entre impacto ambiental y económico, donde gracias a la estrategia propuesta, se asignan tecnologías incluso a aquellos residuos que no cuentan con un alto potencial económico (véase la Figura 4).



**Conclusiones**

La estrategia propuesta para la revalorización de residuos mediante la implementación de un parque industrial para el procesamiento de RSU tiene como objetivos el beneficio económico y la reducción del impacto ambiental y social generado por la pandemia de covid-19, por el alto riesgo que conlleva para la salud; se trata, pues, de una estrategia multiobjetivo para el manejo de RSU. El modelo considera un amplio abanico de opciones para procesar cada uno de los diferentes tipos de residuos; además, selecciona y asigna las capacidades de producción para las plantas de procesamiento de la tecnología seleccionada. Los resultados muestran que es factible implementar un parque industrial que procese todos los residuos generados, y que la tasa de impuestos variable promueve el reciclaje de residuos, maximizando las ganancias incluso para residuos con bajo potencial económico. Las soluciones obtenidas permiten al tomador de decisiones disponer de una amplia variedad de opciones para elegir la solución que mejor se

adapte a los objetivos propuestos. La ubicación del parque industrial es clave para minimizar los costos de transporte, que para residuos con menor potencial económico, pueden ser incluso superiores a los posibles precios de venta de los productos asociados. Esta estrategia puede ser útil en regiones donde la gestión de residuos sólidos municipales no es adecuada y existe un alto riesgo de exposición a ellos.

**Rogelio Ochoa-Barragán**

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.  
1207293g@umich.mx

**Aurora del Carmen Munguía-López**

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.  
1723704c@umich.mx

**José María Ponce-Ortega**

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.  
jose.ponce@umich.mx

## Referencias

- Drabińska, N. *et al.* (2018), “Broccoli by-products improve the nutraceutical potential of gluten-free mini sponge cakes”, *Food Chemistry*, 267:170-177. Disponible en: <[doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.119](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.119)>.
- Escudero, E. (2021), “Mexicanos crean un plástico degradable a base de brócoli”, *Ambiente Plástico*. Disponible en: <<https://www.ambienteplastico.com/mexicanos-crean-un-plastico-degradable-a-base-de-brocoli/>>, consultado el 23 de mayo de 2022.
- Fernández Rivas, D., E. Castro-Hernández, A. L. Villanueva Perales y W. van der Meer (2018), “Evaluation method for process intensification alternatives”, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 123:221-232. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.08.013>>, consultado el 15 de mayo de 2024.
- Ko, S., W. Kim, S.-C. Shin y J. Shin (2020), “The economic value of sustainable recycling and waste management policies: The case of a waste management crisis in South Korea”, *Waste Management*, 104:220-227. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.020>>, consultado el 15 de mayo de 2024.
- Mei, X., H. Hao, Y. Sun, X. Wang y Y. Zhou (2021), “Optimization of medical waste recycling network considering disposal capacity bottlenecks under a novel coronavirus pneumonia outbreak”, *Environmental Science and Pollution Research*. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s11356-021-16027-2>>, consultado el 15 de mayo de 2024.
- Munguía-López, A. C., V. M. Zavala, J. E. Santibáñez-Aguilar y J. M. Ponce-Ortega (2020), “Optimization of municipal solid waste management using a coordinated framework”, *Waste Management*, 115: 15-24. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.006>>, consultado el 15 de mayo de 2024.
- Naciones Unidas (2018), “El desperdicio de comida, una oportunidad para acabar con el hambre”, *Noticias ONU*. Disponible en: <<https://news.un.org/es/story/2018/10/1443382#:~:text=%C2%BFSab%C3%ADa%20que%20el%2045%25%20de,como%203700%20millones%20de%20manzanas>>, consultado el 22 de mayo de 2022.
- Pacheco-Cano, R. D. *et al.* (2020), “Class I defensins (BraDef) from broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) seeds and their antimicrobial activity”, *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36:30. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s11274-020-2807-6>>.
- Pérez-Zavala, M. L. *et al.* (2020), “Agave: A natural renewable resource with multiple applications”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(15): 5324-5333. Disponible en: <[doi.org/10.1002/jsfa.10586](https://doi.org/10.1002/jsfa.10586)>.
- Santibáñez-Aguilar, J. E., J. M. Ponce-Ortega, J. B. González-Campos, M. Serna-González y M. M. El-Halwagi (2013), “Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste”, *Waste Management*, 33(12):2607-2622. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.010>>, consultado el 15 de mayo de 2024.
- Sector agroalimentos Guanajuato (2020), Coordinadora de Fomento al Comercio Exterior. Disponible en: <<https://cofoce.guanajuato.gob.mx/wp-content/uploads/2020/09/Sector-Agroalimentos-Junio-2020.pdf>>, consultado el 21 de mayo de 2022.
- SIAP (2020), “Avance de siembras y cosechas. Resumen por estado”, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: <[http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/ResumenProducto.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do)>, consultado el 5 mayo de 2022.
- The Daily Star (2021), “Poor medical waste management will increase infections”, *The Daily Star*. Disponible en: <<https://www.thedailystar.net/editorial/news/poor-medical-waste-management-will-increase-infections-1909561>>, consultado el 11 de noviembre de 2021.