

## INDICADORES DE LA BIOECONOMÍA CIRCULAR PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Circular bioeconomy indicators for utilization of the organic fraction of municipal solid waste

Paul GARCÍA-BUCIO<sup>1</sup>, Perla Xochitl SOTELO-NAVARRO<sup>2\*</sup>, Héctor Mario POGGI-VARALDO<sup>3\*</sup>, Rosa Olivia CAÑIZARES-VILLANUEVA<sup>3</sup> y Carlos ESCAMILLA-ALVARADO<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Doctorado en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Apdo. Postal 14-740, 07000 Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Cátedra CONACYT-Doctorado Transdisciplinario en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Apdo. Postal 14-740, 07000 Ciudad de México, México.

<sup>3</sup> Grupo de Biotecnología Ambiental y de Energías Renovables (DCTS y DBB), Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Apdo. Postal 14-740, 07000 Ciudad de México, México.

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Químicas, UANL, Avenida Universidad s/n, Cd. Universitaria, Ciudad Universitaria, 66455 San Nicolás de los Garza, N.L.

\*Autores para correspondencia: [perla.sotelo@cinvestav.mx](mailto:perla.sotelo@cinvestav.mx); [lazarillodetormes1001@gmail.com](mailto:lazarillodetormes1001@gmail.com)

*(Recibido: junio 2021; aceptado: enero 2022)*

Palabras clave: bioeconomía circular, indicadores, residuos orgánicos, circularidad

### RESUMEN

Para el desarrollo sostenible es necesario impulsar acciones inherentes a la economía circular (EC), como el manejo y aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos (RSU), incluyendo su fracción orgánica (FORSU) para la obtención de productos de interés comercial. Sin embargo, los criterios y métricas para evaluar la circularidad de los procesos presentan una variedad de formas y referencias y en algunos casos carecen de un marco metodológico claro que permita aplicarlos de forma concreta en los procesos de la bioeconomía circular (BEC), es decir, aquellos que se centran en la gestión de materiales de origen biológico a través de bioprocesos. En este trabajo se propuso revisar críticamente los indicadores publicados para evaluar los procesos de EC, con la finalidad de proponer los más adecuados para su aplicación en sistemas de bioeconomía circular, particularmente en aquellos que involucran el tratamiento de la FORSU. Estos indicadores pueden ser cuantitativos o cualitativos y permiten hacerse de elementos para tomar decisiones económicas, ambientales, sociales y de eficiencia productiva. El conjunto de indicadores propuesto para la evaluación de la circularidad se basó en una revisión crítica para la selección final de 17 métricas e indicadores por la pertinencia de las variables que involucran y su potencial de aplicación a los bioprocesos de tratamiento de la FORSU. Este estudio es relevante porque proporciona información útil para la conformación de un marco conceptual que favorezca el progreso de la bioeconomía circular y su aplicación en la gestión de la FORSU.

Key words: circular bioeconomy, indicators, biowaste, circularity

## ABSTRACT

For a sustainable development it is necessary to promote the actions inherent to circular economy (CE), such as the proper management and use of municipal solid waste (MSW) including its organic fraction (OFMSW) to obtain products with commercial relevance. Nonetheless, the criteria and metrics to evaluate circularity of products and processes present a variety of forms and references, and in some cases, they lack a clear methodological framework that allows to apply them in a concrete way in circular bioeconomy (CBE), what means the treatment of materials of biological origin through bioprocesses. In this work, we critically reviewed the published indicators that are used to evaluate the CE processes to collect the appropriate indicators for their application in circular bioeconomy systems, particularly those that involve the treatment of the OFMSW. These indicators can be quantitative or qualitative and provide decision makers with elements on economics, environment, society, and productive efficiency aspects. The group of selected indicators from our review process consists of 17 metrics and indicators that were chosen regarding the relevance of the variables they involve and their potential for application to OFMSW treatment bioprocesses. This study is a contribution to the organization of the existing technical information on this type of indicators and provides useful information for a conceptual framework that fosters the progress of the circular bioeconomy and its application to OFMSW.

## INTRODUCCIÓN

En años recientes se ha presentado un creciente interés en la búsqueda de alternativas eficientes para evitar, disminuir y disponer de la gran cantidad de residuos generados en el mundo asociados con el crecimiento económico, poblacional y el avance tecnológico. Hasta ahora la satisfacción de las necesidades se ha llevado a cabo de forma lineal: extracción-producción-uso-desecho, lo cual ha contribuido al deterioro ambiental que se manifiesta como acidificación, calentamiento global y eutrofización, entre otros que se utilizan para evaluar los impactos ambientales relacionados con el ciclo de vida (CV) de productos y servicios (Lagerkvist et al. 2012, CCA 2017, Hettiarachchi et al. 2018, Viaggi 2018).

La EC permite sustituir el modelo lineal con alternativas como reducción, reúso alternativo, reciclaje, recuperación y reincorporación de materiales en las diversas etapas del proceso o tecnología examinada. Este procedimiento se lleva a cabo tanto a nivel micro, meso y macroeconómico, y su meta es alcanzar el desarrollo sostenible (Ghisellini et al. 2016, Kirchherr et al. 2017, Linder et al. 2017). Este podrá lograrse sobre la base del aprovechamiento y uso racional de los recursos existentes pero limitados y que están distribuidos inequitativamente en el mundo (Georgescu-Roegen 1977, Granta et al. 2015, Giannakitsidou et al. 2020).

De acuerdo con los expertos, tanto la sociedad, como el gobierno, la academia y las empresas deberían adoptar un sistema integral de gestión de los RSU que incluya procesos y tecnologías adecuadas para minimizar los impactos socioambientales asociados con su manejo al tiempo que se maximiza su aprovechamiento para incentivar el desarrollo sostenible (De Besi y McCormick 2015, Azevedo et al. 2017, Devaney y Henchion 2018, Hettiarachchi et al. 2018, Lokesh et al. 2018). En la **figura 1** se observan las etapas de este sistema integral y los diversos materiales que se pueden recuperar en cada una de ellas previo a su envío al relleno sanitario.

La EC y la bioeconomía se complementan, ya que buscan alcanzar un desarrollo tecnológico y económico sostenible que permita minimizar el agotamiento de los recursos y los impactos ambientales (Lieder et al. 2017, Viaggi 2018). Ambos conceptos presentan un modelo restaurador y regenerativo que propone mantener productos, componentes y materiales con utilidad y valor por más tiempo reemplazando el fin del ciclo de vida por conceptos como reciclaje, reúso, etc. (Pauliuk 2018). Enfoques más amplios como la integración circular concentran elementos sinérgicos de ecología industrial, economía circular y ecodiseño, donde también es viable la inclusión de los bioprocesos para aumentar los flujos circulares en industrias y economías (Hodson et al. 2019, Walmsley et al. 2019).

Por su parte, la bioeconomía circular (BEC) es la intersección de la bioeconomía con la economía

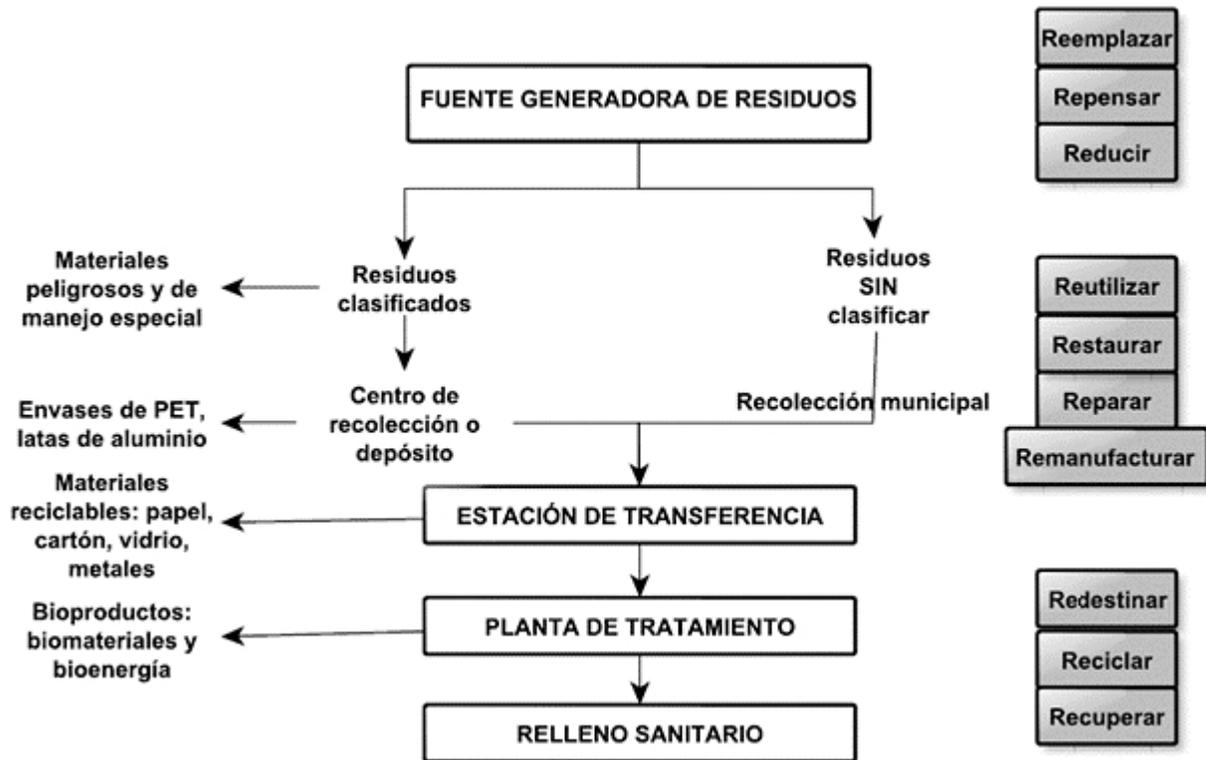


Fig. 1. Sistema integral de gestión de residuos urbanos. Adaptado de Tchobanoglous et al. (2002).

circular y busca aplicar la circularidad en los recursos biomásicos, minimizando la presión sobre los recursos naturales y el consumo de combustibles fósiles, aumentando la eficiencia de los procesos y disminuyendo las huellas hídricas y de carbono, además de valorizar y generar empleos de valor. Incluye la manufactura de productos de base biológica, el aprovechamiento en cascada y la aplicación de estrategias de las 10R, por ejemplo, repensar, reemplazar y reducir pueden aplicarse en la etapa de compraventa de productos principalmente para prevenir la generación de RSU incluida su fracción orgánica. Una vez que se generan los RSU y FORSU, éstos se pueden reutilizar, restaurar o reparar. Finalmente, ya que fueron recolectados y transportados se pueden reciclar, redestinar, recuperar y remanufacturar con el objetivo de evitar que lleguen a la disposición final sin ser aprovechados. En el caso particular de la FORSU, ésta se puede tratar en procesos como biorrefinerías, compostaje, digestión anaerobia o incineración (Haug 1993, Tchobanoglous et al. 2002, Maina

et al. 2017, Potting et al. 2017, Carus y Dammer 2018, Bhaskar et al. 2020).

En la **figura 2** se presenta el marco integral para el desarrollo de una BEC incorporada en la cadena de suministro, desde la extracción de los recursos naturales hasta la disposición final de la FORSU, la aplicación de las 10R y su transformación a través de bioprocesos para obtener biomateriales y bioenergía aprovechables en etapas previas de la propia cadena como extracción, acondicionamiento o manufactura.

Se define la circularidad a nivel producto como la fracción de un producto que proviene de materiales no vírgenes que se aprovechan a través de estrategias como las 10R u otras que permitan preservar su utilidad. Un bucle cerrado se presenta cuando todos los componentes son recirculados, un bucle abierto si se recicla sólo una parte de éstos y un reciclaje en cascada cuando se reprocesan materiales provenientes de un bucle abierto (Park y Chertow 2014, Dahiya et al. 2018, Kalmykova et al. 2018).

La circularidad de un producto puede evaluarse con el uso de los indicadores apropiados que den evidencia

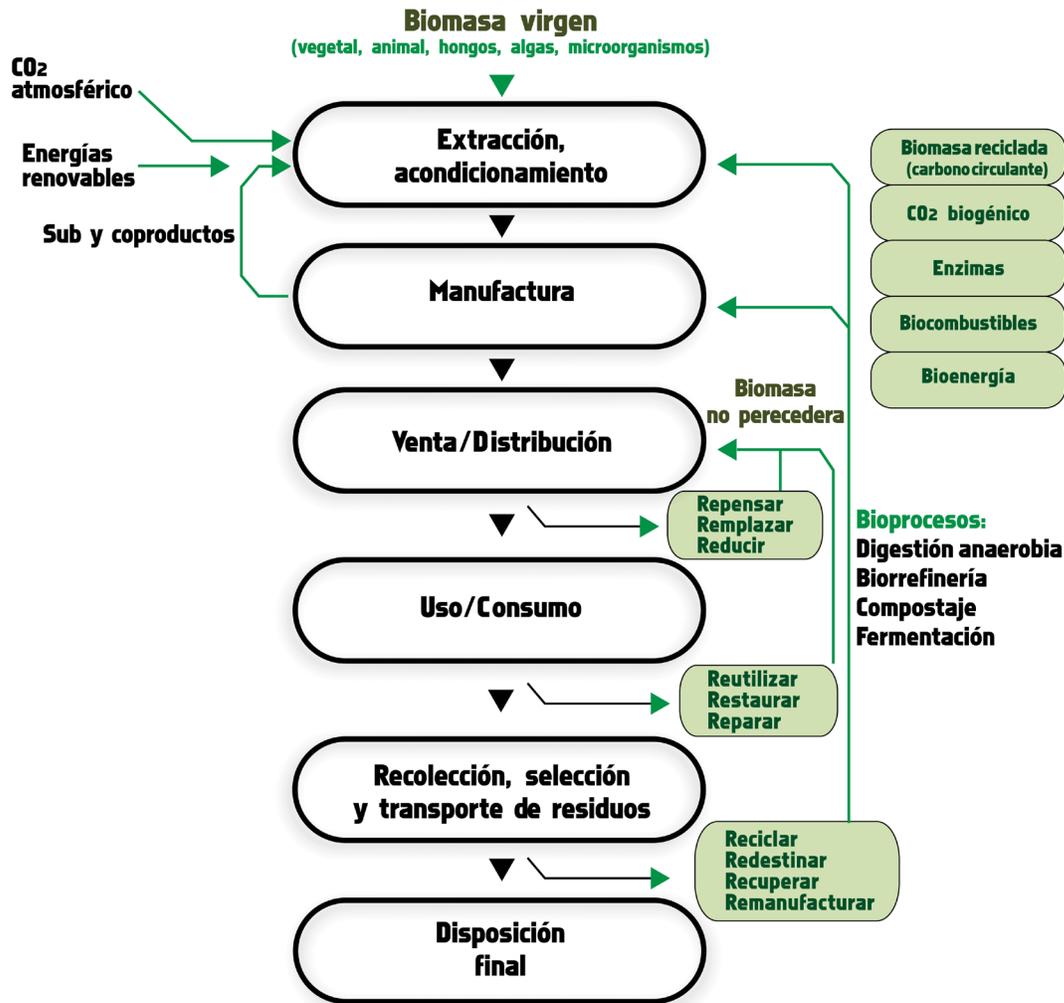


Fig. 2. Marco integral de la bioeconomía circular. Elaboración propia.

de los cambios en los materiales y sus efectos en el ambiente y la economía (Linder et al. 2017).

La Fundación Ellen MacArthur (EMF) propone cuatro aspectos a considerar para evaluar la circularidad: i) productividad de recursos, ii) actividades circulares, iii) generación de residuos y obtención de energía; y iv) emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (Granta y EMF 2015). También se ha tomado en cuenta el análisis de los materiales con sus impactos económicos y ambientales (Niero et al. 2019).

Los indicadores de la EC son herramientas que proporcionan datos cuantitativos o semicuantitativos que permiten evaluar el proceso de transición a la EC en términos de su avance, cambios o impactos.

Por ejemplo, la energía consumida en las etapas de reciclaje se ha propuesto como indicador de circularidad. Existen indicadores económicos cuya cuantificación puede incluir la generación de valor agregado, el empleo, las patentes y las inversiones (Potting et al. 2017).

Se ha observado que los indicadores materiales o energéticos resultan más precisos que los financieros, ya que, por ejemplo, algunos esfuerzos comerciales para favorecer la circularidad pueden propiciar que otras cadenas productivas se vuelvan menos circulares (Potting et al. 2017).

El hecho de aplicar los indicadores a los bioprocesos para el tratamiento de la FORSU implica evaluar

también el destino de las impurezas y la captura de los nutrientes presentes en ella, como es la aplicación de composta en el suelo, entre otros (Vea et al. 2018).

La finalidad de este trabajo fue revisar críticamente los indicadores y métricas publicados para la economía circular. Esto permitirá identificar aquellos indicadores adecuados para su aplicación en procesos de la BEC.

## METODOLOGÍA

Se realizó la revisión de literatura en Web of Science (base de datos de Clarivate Analytics) y Google Académico como motores de búsqueda para los artículos, informes y revisiones publicadas, sin restricción por el año de publicación. Se incluyeron además algunos informes técnicos de estudios realizados por instituciones internacionales reconocidas en el campo de la EC, como la Fundación Ellen Mac Arthur y el Centro Internacional de Referencia para el Ciclo de Vida de los Productos, los Procesos y los Servicios de Canadá (CIRAIG).

La búsqueda, recolección y organización de publicaciones se realizó entre noviembre de 2019 y enero de 2021. Se recuperaron aquellos documentos que incluyen conceptos clave como economía circular, bioeconomía, indicadores y sus sinónimos o sucedáneos como métrica. Las palabras de búsqueda fueron: ((circular bioeconom\*) OR (circular econom\*)) AND (indicator\* OR metric\*); (circular econom\*) AND (indicator\* OR metric\*) AND waste circularity AND (metric\* OR indicator\*) (circular bioeconom\*) AND (indicator\* OR metric\*).

Posteriormente fueron clasificadas de acuerdo con su enfoque en la propuesta de indicadores y su aplicación en la evaluación de la economía circular. Se consideraron tres ejes principales: gestión de energía, flujo de materiales y aspectos de índole socioeconómica.

Se distinguió entre artículos originales y de revisión. Se dio prioridad a aquellas publicaciones que

presentaran en el resumen una mención explícita de los indicadores y métricas para la evaluación de la economía circular a nivel microeconómico o industrial, centrados además en los materiales, la energía y los aspectos sociales.

En los indicadores seleccionados se analizó la utilidad para los usuarios, así como las variables que incluyen. Se consideraron factores científicos, funcionales y pragmáticos, entre los que se encuentran: el nivel de aplicación, la mensurabilidad, significancia para los usuarios potenciales, claridad, demanda de información, entre otros (Saidani et al. 2018, Burgherr 2005).

Después del análisis se conservaron únicamente aquellos con potencial para el desarrollo de la BEC, en particular los relacionados con la gestión de la FORSU y su circularidad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La búsqueda en las bases de datos con las palabras mencionadas en la metodología generó los resultados que fueron considerados para el proceso de revisión de los indicadores publicados (**Cuadro I**).

Se analizaron 32 indicadores que se dividieron en dos grupos: 15 relacionados específicamente con la EC de materiales como metales y plásticos y 17 indicadores con potencial aplicación específica a los procesos de la BEC. Estos se subclasificaron a su vez en los siguientes subgrupos según su enfoque en: grupo A: materiales y energía (15 indicadores); grupo B factores socioeconómicos para la utilización de los recursos (8 indicadores); grupo C: minimización de la generación de desechos y emisiones (2 indicadores), y grupo D: los que integran dos o más de los aspectos anteriores (7 indicadores), lo cual permitirá crear una base para los procesos de la BEC y sus productos. (**Cuadro II**).

Se han publicado algunas revisiones de indicadores para la EC (CIRAIG 2015, Elia et al. 2017,

**CUADRO I.** NÚMERO DE RESULTADOS POR PALABRAS DE BÚSQUEDA Y BASE DE DATOS.

Palabras de búsqueda	Web of Science	Google Académico
((circular bioeconom*) OR (circular econom*)) AND (indicator* OR metric*)	767	11 100
(circular econom*) AND (indicator* OR metric*) AND waste circularity AND (metric* OR indicator*)	358	19 400
(circular bioeconom*) AND (indicator* OR metric*)	312	26 500
(circular bioeconom*) AND (indicator* OR metric*)	30	11 600

**CUADRO II. RECOPIACIÓN DE INDICADORES DE LA ECONOMÍA CIRCULAR APLICABLES A NIVEL MICROECONÓMICO (PRODUCTO Y PROCESO) (continúa).**

Nombre en español y sigla (Nombre en inglés y sigla)	Descripción	Referencia
<b>Grupo A. Indicadores centrados en la energía y materiales</b>		
Indicadores de eficiencia o desempeño en producción	Comprende indicadores que expresan la eficiencia en el uso de los recursos. Por ejemplo, volumen de agua recuperada respecto al total de agua empleada en el proceso.	Molina-Moreno et al. 2017
Longevidad (L) Longevity (L)	Busca mostrar el período de tiempo durante el cual se retiene un material en un sistema productivo. Dicha retención es un modo de maximizar los recursos a través de la reutilización y reciclaje. Adopta un valor no monetario. Se calcula como la suma de la vida útil inicial del producto, la contribución por vida reacondicionado y la contribución de vida por reciclaje.	Franklin-Johnson et al. 2016
Herramienta REPRO REPRO tool	Comprende el desarrollo de una herramienta para integrar los procesos de reusar, remanufacturar y reciclar (3R) en el proceso de diseño de productos eléctricos y electrónicos, empleando análisis estadísticos para diferentes escenarios de productos de fin de vida.	Gehin et al. 2008
Número de veces de uso del material (NVU) Number of times used (NTU)	Se refiere a la cantidad promedio de veces que un material se usa en una sociedad desde la cuna hasta la tumba referido al impacto ambiental del material virgen (hierro).	Linder et al. 2017
<b>Grupo B. Indicadores centrados en aspectos socioeconómicos</b>		
Circularidad a Nivel Producto (CNP) Product-Level Circularity (PLC)	Se define como la fracción de un producto que proviene de productos usados en términos económicos. Se basa en la relación entre el valor de la fracción recirculada y valor económico total del producto. La circularidad oscila entre 0 y 1 (0 % a 100 %).	Linder et al. 2017
Facilidad de Desmontaje del Producto (FDP) Ease of Disassembly Metric (eDIM)	Busca cuantificar el esfuerzo necesario para desmontar total o parcialmente un producto en términos del tiempo real necesario para las tareas de desmontaje promoviendo la reparación, reutilización, remanufactura y reciclaje.	Vanegas et al. 2018
Tiempo Medio de Residencia en la Sociedad (TRMS) Average Residence Time in Society (ARTS)	Se refiere al tiempo que transcurre desde la extracción del material (hierro) hasta que éste llega al relleno sanitario después de un número determinado de transiciones.	Matsuno et al. 2007
Average Residence Time in Society (ARTS)		
<b>Grupo C. Indicadores centrados en minimización de desechos y emisiones</b>		
Indicador de Desempeño en Economía Circular (IDEC) Circular Economy Performance Indicator (CPI)	Indica que los impactos ambientales dependen de la calidad de los residuos que se destinan a reciclaje, si la calidad de los residuos es baja, el reciclaje puede resultar en altos impactos ambientales.	Huysman et al. 2017 citado en Moraga et al. 2019
Análisis de Ciclo de Vida (ACV) Life Cycle Assessment (LCA)	Hay una amplia disponibilidad de indicadores de impacto ambiental, como acidificación, eutrofización, huella de carbono, etc. Algunas herramientas híbridas de ACV combinan estos indicadores ambientales con socioeconómicos.	Veja et al. 2018

**CUADRO II. RECOPIACIÓN DE INDICADORES DE LA ECONOMÍA CIRCULAR APLICABLES A NIVEL MICROECONÓMICO (PRODUCTO Y PROCESO).**

Nombre en español y sigla (Nombre en inglés y sigla)	Descripción	Referencia
<b>Grupo D. Indicadores que combinan factores materiales, de energía, socioeconómicos y ambientales</b>		
Desempeño en Economía Circular (DEC) Circular Economy Performance (CEP)	Es un indicador compuesto, incluye aspectos socioeconómicos y la capacidad de aprovechamiento de los residuos sólidos municipales aplicando análisis envolvente de datos. Considera indicadores como la tasa de uso circular del material (UCM), la generación per cápita de residuos, la tasa de reciclaje y el índice de progreso social de los países.	Giannakitsidou et al. 2020
Índice Circular Sostenible (ICS) Sustainable Circular Index (SCI)	Considera cuatro ámbitos: económico, social, ambiental y la circularidad, busca maximizar el valor económico generado y distribuido, minimizar los accidentes de trabajo, el trabajo precario; los desechos peligrosos, el agua consumida, así como los consumos de material virgen, fomentando el reciclaje. A través del método Delphi pondera el tiempo e intensidad de uso, la circularidad de materiales (ICM) y la eficiencia de reciclaje.	Azevedo et al. 2017 citado en Moraga et al. 2019
Herramienta de simulación multi-método para evaluar la EC. Multi-method simulation tool for CE assessment	Es una herramienta de análisis cuantitativo para explorar el diseño del producto, modelo de negocio y cadena de suministro para ofrecer resultados basados en esfuerzos de diseño planificados, estrategias de fin de vida útil (reutilización, remanufactura, reciclaje) en diferentes configuraciones de negocio.	Lieder et al. 2017
Relación Ecoeficiencia Valor (CEV) Eco-Efficient Value Ratio (EVR)	Relaciona los costos ecológicos a partir de sus impactos ambientales (ACV) y los costos de producción con el valor agregado de un producto o servicio en el mercado.	Scheepens et al. 2016
Marco de la cuna a la cuna (C2C) Cradle-to-Cradle Framework (C2C)	Se fundamenta en cinco principios clave: selección y reutilización de materiales, uso de energías renovables en el sistema de productivo, administración del agua y equidad social. Es bastante amplio y no tiene en cuenta los diferentes tipos de material.	C2CII 2014
Requerimiento total de materiales (RTM) Total Material Requirement (TMR)	Expresa la masa total de materiales de extracción primaria para realizar las actividades humanas incluyendo actividades comerciales y servicios. A diferencia del indicador entrada directa de materiales (EDM), este considera los “flujos ocultos” que se asocian al proceso para determinar el impacto ambiental real.	EEA 2008
<b>Indicadores de la economía circular seleccionados a nivel producto y proceso con potencial aplicación a la BEC.</b>		
Nombre en español y sigla (Nombre en inglés y sigla)	Descripción	Referencia
<b>Grupo A. Indicadores centrados en la energía y materiales</b>		
Uso Circular del Material (UCM) Circular Material Use Rate (CMUR)	Es la relación entre el uso circular de materiales reciclados y el total uso de material en proceso. Los valores altos de UCM implican que se utilizan más materiales secundarios para sustituir las materias primas vírgenes, reduciendo el impacto ambiental.	Eurostat 2018
Indicador de Circularidad de Material (ICM) Material Circularity Indicator (MCI)	Mide el uso de material virgen y residuos resultantes enviados al relleno sanitario o a recuperación de energía. Considera la masa de materia prima virgen utilizada en la fabricación, la masa de residuos inevitables del producto, y un factor de utilidad que explica la longitud e intensidad de uso del producto.	Granta y EMF 2015
Indicador de Flujo Lineal (IFL) Linear Flow Index (LFI)	Mide la proporción de material que fluye de forma lineal, es decir, que termina como desecho irre recuperable. Es calculado dividiendo la cantidad de material que fluye de manera lineal por la suma de cantidades de material que fluye de forma lineal y restauradora (masa total). El índice toma un valor entre 1 y 0, donde 1 es un flujo completamente lineal y 0 a flujo completamente restaurador.	Granta y EMF 2015

**CUADRO II. INDICADORES DE LA ECONOMÍA CIRCULAR SELECCIONADOS A NIVEL PRODUCTO Y PROCESO CON POTENCIAL APLICACIÓN A LA BEC.**

Nombre en español y sigla (Nombre en inglés y sigla)	Descripción	Referencia
Indicador de Potencial de Reuso (IPR) Reuse Potential Indicator (RPI)	Indica cuánto un material es "similar a un recurso" en lugar de asemejarse a "un desperdicio" considerando las tecnologías disponibles.	Park et al. 2014
Tasa de Recolección de los Residuos (TRR) Old Scrap collection Rate (OSR)	Se refiere a la cantidad de material contenido en los residuos que es viable para incorporarse al proceso productivo en lugar de enviarse a relleno sanitario.	Graedel et al. 2011
Eficiencia de Reciclaje (ER) Recycling process efficiency Rate (RR)	Expresa la cantidad de material obtenido como producto final a partir del procesamiento inicial de los residuos a la entrada del proceso.	Graedel et al. 2011
Tasa de Entrada a Reciclaje (TER) Recycling Input Rate (RIR)	Describe la fracción de metal secundario (chatarra) en la entrada de producción. El metal primario a la entrada se calcula como mineral extraído menos pérdidas.	Graedel et al. 2011
Eficiencia energética (EE) Energy efficiency (EE)	Representa el hecho de usar menos energía para producir la misma cantidad de servicios o productos útiles en el mercado.	Farla et al. 2001
Consumo Energético Específico (CEE) Specific Energy Consumption (SEC)	Es la cantidad de energía (entalpía) necesaria para ejecutar una determinada actividad. Por ejemplo, energía invertida en el procesamiento de una tonelada de residuos (MJ/ton).	Worrell et al. 1997
Indicador de Reutilización de Material (IRM) Material Reutilization Score, (MRS)	Cuantifica el potencial de reciclabilidad medio ponderado de un producto considerando la reciclabilidad intrínseca (IR) del producto, es decir, el % del producto que puede reciclarse al menos una vez después de su etapa de uso inicial y el % de contenido reciclado (RC) en el producto. Su valor final que oscila entre 0 y 100.	Braungart et al. 1992
Energía Incorporada (EIN) Embodied Energy (EEN)	Representa la energía empleada para producir un bien o un servicio considerando su ciclo de vida completo.	Costanza 1980
<b>Grupo B. Indicadores centrados en aspectos socioeconómicos</b>		
Eficiencia del Material (EM) Material Efficiency (ME)	Se refiere a la intensidad de uso o productividad. El primero es la relación entre un indicador material (como numerador) y un indicador económico (como un denominador), que refleja la cantidad de entrada de material por unidad de salida económica o producto.	Allwood et al. 2011
Inclusión de proveedores (IP) Provider inclusivity (PI)	Representa el grado en que los proveedores de servicios relacionados con la recuperación, valorización y reciclaje están incluidos en el proceso de planificación y gestión de los residuos. Puede evaluarse en términos de trabajadores/km <sup>2</sup> o número de trabajadores por empresa del sector.	UN-Habitat 2010
Empleos Formales Generados (EFG) Formal Employment (FE)	Considera la generación de empleos directamente relacionados con la gestión y procesamiento de los residuos, así como los empleos auxiliares relacionados en las instalaciones dedicadas al procesamiento de estos. Por ejemplo, número de empleos formales permanentes por cada 10 mil toneladas de capacidad de procesamiento de residuos.	Goldman et al. 2001
Índice de Economía Circular (IEC) Circular Economy Index (CEI)	Es la relación del valor del material reciclado (valor de mercado) proveniente de productos a su fin de ciclo de vida respecto del valor total del material que ingresa a la instalación de reciclaje para elaborar nuevos productos (normalmente más unidades del mismo producto).	Di Maio et al. 2015
Intensidad Energética (IE) Energy Intensity (EI)	Representa la cantidad de energía necesaria para realizar una determinada actividad económica expresada en términos monetarios. Generalmente, el valor agregado o la producción bruta se utilizan como denominador (por ejemplo, MJ/\$).	Worrell et al. 1997

**CUADRO II.** INDICADORES DE LA ECONOMÍA CIRCULAR SELECCIONADOS A NIVEL PRODUCTO Y PROCESO CON POTENCIAL APLICACIÓN A LA BEC.

Nombre en español y sigla (Nombre en inglés y sigla)	Descripción	Referencia
<b>Grupo D. Indicadores que combinan factores materiales, de energía, socioeconómicos y ambientales</b>		
Desmaterialización (Dm) Dematerialization (Dm)	Se refiere al hecho de reducir la cantidad de materiales utilizados y/o la cantidad de residuos generados en la producción de una unidad económica.	Cleveland et al. 1998

Pauliuk 2018, Zhang et al. 2018, Moraga et al. 2019) a diferentes niveles de estudio y de aplicación como el macro, meso y microeconómico. Sin embargo, la principal atención se ha puesto en materiales reciclables de alto interés económico como son los metales y envases, centrados en la optimización de materiales y los potenciales impactos ambientales, omitiendo los indicadores asociados a materiales orgánicos en algunos casos. Trabajos recientes como la revisión realizada por Navare et al. (2021) se concentran en la medición de la EC aplicada a los ciclos biológicos a través de una comparación de las características de estos ciclos y los criterios de monitoreo de la EC con base en su aporte a la agricultura sostenible, aprovechamiento de los recursos en cascada, ciclo de aprovechamiento biológico de los nutrientes e impactos ambientales.

Una de las principales limitaciones encontradas en los indicadores para la EC es la falta de especificidad, ya que no distinguen claramente entre materiales reciclados, remanufacturados o reutilizados.

Esto genera ambigüedad a la hora de calcular y reportar un valor de respuesta, y requiere la introducción de explicaciones o consideraciones adicionales, como el caso del indicador de circularidad de material (ICM) que demanda conocer la eficiencia para los procesos de reciclaje (Worrell et al. 1997, Graedel et al. 2011, Granta y EMF 2015).

Lo anterior revela la mínima aplicación de los indicadores de la EC en bioprocesos que involucran el aprovechamiento de la FORSU, por lo que hay oportunidades para definir indicadores específicos que estimen su circularidad y la de los procesos a través de los cuales es transformada.

### **Grupo A. Indicadores de circularidad de materiales y energía**

En este grupo, que es el más numeroso, se incluyeron inicialmente 15 indicadores como UCM (Eurostat 2018), IPR (Park et al. 2014), ER, TER y TRR (Graedel et al. 2011), EE (Farla et al. 2001) y la herramienta REPRO (Gehin et al. 2008), entre otros.

Éstos tienen en común el enfoque centrado en relacionar la cantidad de material obtenido como producto o la cantidad de material residual o incluso reciclado que se envía a tratamiento final con relación a la cantidad inicial de material primario, virgen o lineal cuantificado en diferentes puntos como la entrada de la planta de procesamiento, la entrada a proceso, etc. Sin embargo, algunos como la longevidad (que se calcula como la suma de la vida útil inicial del producto, la contribución por vida reacondicionado y la contribución de vida por reciclaje) se descartaron, ya que no hacen distinción entre el material original y el reacondicionado para materiales biomásicos porque se centran en productos inorgánicos dado que son susceptibles de reacondicionamiento para tener una segunda vida antes de ser transformados o reciclados. Un caso similar es el indicador NVU (Linder et al. 2017) que se centra en el número promedio de veces que un material se usa en una sociedad, sin considerar a los residuos perecederos y biodegradables como la FORSU. Por lo anterior, estos últimos no aparecen en el grupo de los 11 indicadores seleccionados.

Una de las propuestas más robustas y conocidas es el ICM de Granta y EMF (2015), el cual determina qué tan circular es un producto dado su contenido de materiales de nueva obtención o extracción y de materiales reciclados en su composición o fabricación. El ICM considera el índice de flujo lineal (IFL) y el factor de utilidad (X).

El IFL, a su vez, evidencia la tasa de material que fluye de forma directa, es decir, que termina como desecho irre recuperable. Su valor varía entre un flujo 100 % restaurador y 100 % directo. Un producto será completamente lineal si está hecho a partir de material virgen y va completamente a relleno sanitario o incineración al final de su vida útil, es decir, su IFL será 1. El IFL se calcula con la Ec. 1 presentada a continuación donde  $V$  es la masa de material virgen,  $W$  es la masa total no recuperable,  $M$  es la masa total del producto en estudio,  $Wf$  es la masa irre recuperable al acondicionar la materia prima para

entrar a proceso y  $Wc$  es la masa irrecuperable luego de recolectar y antes de acondicionar los insumos.

$$IFL = \frac{V + W}{2M + \frac{Wf - Wc}{2}} \quad (1)$$

El factor de utilidad ( $X$ ) está constituido por dos partes. Una representa el tiempo de vida útil y la otra expresa la intensidad de uso. Así,  $X$  se determina con la ecuación 2 donde  $L/Lav$  explica la vida útil del producto (reducida o aumentada) respecto de la vida útil de la industria promedio  $Lav$ . Por otro lado,  $U/Uav$  es el componente de intensidad de uso que refleja la medida en que un producto se utiliza a su plena capacidad respecto del uso promedio.

$$X = \left(\frac{L}{Lav}\right)\left(\frac{U}{Uav}\right) \quad (2)$$

Finalmente, se calcula el ICM con la Ec. 3, donde  $IFL$  es el indicador de flujo lineal y  $F(X)$  es la función de maximización de  $X$  (el factor de utilidad).

$$ICM = 1 - IFL \cdot F(X) \quad (3)$$

En el ámbito energético, tenemos indicadores como la EE (Farla et al. 2001) y el CEE (MJ/t de producto) (Worrell et al. 1997) que hace referencia a la energía consumida en términos físicos para el proceso productivo. La EIN (Costanza 1980) calcula la energía empleada para producir un bien o un servicio considerando su ciclo de vida, y en el caso de la FORSU se puede calcular a partir de la energía consumida durante el bioproceso que se decida emplear para su tratamiento.

### Grupo B. Indicadores centrados en aspectos socioeconómicos

Se encontró un reducido número de indicadores que toman en cuenta a los factores socioeconómicos a nivel microeconómico o industrial (producto o proceso), ya que son utilizados principalmente a nivel macroeconómico para evaluar la transición hacia una EC por los países o regiones (De Besi y McCormick 2015, Ghisellini et al. 2016, Ronzon y M'Barek 2018). Entre estos indicadores tenemos la circularidad a nivel producto (CNP) (Linder et al. 2017), la facilidad de desmontaje del producto (FDP) (Vanegas et al. 2018) y el tiempo medio de residencia en la sociedad (TRMS) (Matsuno et al. 2007). Por ejemplo, la principal limitación del CNP radica en que se debe asignar previamente un valor económico a los residuos para su determinación y, por otro lado, la FDP cuantifica el tiempo necesario para desmontar total o parcialmente un producto en sus componentes, por lo que pierden sentido en el caso de la FORSU.

En el grupo de los indicadores con potencial están aquellos que estiman los empleos que se generan por la puesta en marcha de proyectos e instalaciones para el tratamiento de la FORSU, el cual depende de la capacidad instalada y el método de procesamiento empleado. Por ejemplo, según las referencias por cada 10 mil toneladas de RSU procesados en una planta de reciclaje se generan 5.99 empleos, mientras que en una planta de incineración solo 1.33 empleos (Goldman et al. 2001, UN-Habitat 2010).

En este grupo también se incluyó la IE que describe la cantidad de energía necesaria para realizar un proceso productivo respecto del valor agregado o valor de la producción (en MJ/\$), el cual se puede asociar al valor comercial de los bioproductos obtenidos, como composta, gases, ácidos orgánicos, etc. (Worrell et al. 1997).

### Grupo C. Indicadores centrados en minimización de desechos y emisiones

En este grupo se colocaron los indicadores IDEC y ACV. Este último, más que un indicador, es una metodología que se aplica para determinar los impactos ambientales a través de categorías como acidificación, eutrofización, huella de carbono, entre otras, para proponer mejoras en los procesos (Ahlgren et al. 2015, Scheepens et al. 2016). Por su parte, el IDEC (Huysman et al. 2017) indica que los impactos ambientales dependen de la calidad de los residuos que se destinan a reciclaje; si la calidad de los residuos es baja, el reciclaje puede resultar en altos impactos ambientales, lo cual demanda una caracterización física y química de la FORSU para establecer niveles de calidad y asociarlos a un grado mayor o menor de impacto ambiental.

### Grupo D. Indicadores que combinan factores materiales, de energía, socioeconómicos y ambientales

Finalmente se agruparon aquellas propuestas complejas que ofrecen combinación de factores, lo cual en la mayoría de los casos impacta en la facilidad de uso para el usuario y en la accesibilidad, ya que se encuentran en forma de aplicativos que no son gratuitos. Por ejemplo, se tienen indicadores como el desempeño en economía circular (DEC) (Giannakitsidou et al. 2020) que requiere análisis envolvente de datos, el índice circular sostenible (ICS) (Azevedo et al. 2017) que demanda entre otras cosas la aplicación del método Delphi, la relación ecoeficiencia-valor (CEV) (Scheepens et al. 2016) que requiere el uso de los llamados costos ecológicos y el requerimiento total de materiales (RTM) (EEA 2008) cuya determinación depende de los costos ocultos asociados al proceso.

Sin embargo, para este grupo sólo clasificó la desmaterialización (Cleveland et al. 1998) que se refiere a la cantidad de materiales utilizados y/o la cantidad de residuos generados en la producción de una unidad económica.

### Ejemplo de aplicación en el tratamiento de la FORSU en compostaje

Se puede evaluar el IFL para la FORSU tratada en un bioproceso como el compostaje. Consideremos una nula masa de material virgen ( $V=0$ ) ya que se emplea únicamente FORSU y agua tratada o de lluvia. Para la masa no recuperable ( $W$ ) se tienen 1159 kg de  $\text{CO}_2$  biogénico producido por la degradación de la materia orgánica, que normalmente no se recupera. La masa total del producto obtenido ( $M=603$  kg) es la masa final de composta obtenida.  $W_f$  (21 kg) se compone principalmente de materiales no susceptibles de degradación biológica, y es separada por el proceso de tamizado. El valor de  $W_c$  se considera despreciable, ya que la FORSU se recibe clasificada en la instalación. Con estos valores se calcula un IFL de 0.95 que indica un elevado flujo lineal de materiales; sin embargo, el resultado es alto por estar asociado a la liberación del  $\text{CO}_2$  biogénico a la atmósfera. Este valor disminuye drásticamente (IFL=0) si se atrapa y almacena el  $\text{CO}_2$  generado o si se desprecia por su origen biogénico (Ahlgren et al. 2015).

Para establecer el factor de utilidad de la FORSU utilizada para composta se deben hacer ciertas consideraciones, por ejemplo, asumir que la vida de anaquel de un alimento fresco es de seis días en condiciones de refrigeración, tras lo cual su vida útil como alimento termina; sin embargo, se puede establecer que se amplía su vida útil a través del proceso de compostaje en términos del aprovechamiento del carbono circulante que contiene por fijación para la formación de biomasa, sin perder de vista que la composta resultante no presenta el mismo valor ni cualidades químicas y económicas que el producto alimenticio del que proviene (Bleam 2017, Lemos et al. 2017).

Usando la ecuación 2 se obtiene un factor de utilidad de 25, suponiendo una vida ampliada ( $L$ ) de 150 días determinado por la duración del compostaje y su aplicación además de una vida promedio ( $L_{av}$ ) de seis días para el alimento de origen en refrigeración. El factor  $U/U_{av}$  se asume como 1 para evitar duplicidad al cuantificar los efectos.

Puede observarse que, si se toma en cuenta la liberación de  $\text{CO}_2$  biogénico producido como irrecuperable en el IFL, se obtiene un valor negativo (ICM = -22.75) lo cual se resuelve asumiendo que el  $\text{CO}_2$  generado se atrapa (para su posterior

purificación y aprovechamiento en industrias como la de bebidas carbonatadas), o que simplemente se desprecia por ser de origen biogénico (Ahlgren et al. 2015, Rodin et al. 2020), lo que resulta en un ICM = 1, es decir, se tiene una completa circularidad de los materiales.

## CONCLUSIONES

Se encontró que, de la variedad de indicadores propuestos a la fecha, son 17 los indicadores que tienen mayor potencial de aplicación a procesos de la BEC emergente entre los que se encuentran: el ICM, el IFL, la TRR y la IP, entre otros, como alternativas al momento de evaluar a nivel microeconómico a los procesos que involucran biomasa como la FORSU, ya que se centran en la reintegración de los materiales y la minimización de los residuos y de la energía utilizada.

Los indicadores para la EC se centran en procesos como el diseño, operación y reciclaje de materiales del llamado “ciclo tecnológico”, donde predominan los metales y plásticos, excluyendo a los materiales biomásicos. Los indicadores encontrados dan evidencia de ello, ya que no hacen clara distinción entre materiales reutilizados o reciclados, como el número de veces de uso del material (NVU) y por estar enfocados principalmente en metales no toman en cuenta el carácter perecedero y biodegradable de la FORSU.

Si bien las herramientas desarrolladas por los autores revisados representan una propuesta concreta en la búsqueda de la simplicidad, que permita involucrar a los diferentes sectores participantes para la elección de indicadores adecuados y aplicarlos en los procesos, enfrentan limitaciones de accesibilidad y disponibilidad. Esto resalta la importancia del trabajo conjunto de los desarrolladores de los indicadores y los ejecutores de los procesos para comprobar su eficiencia, robustez y aplicabilidad sistemática, y, en su caso, encontrar las limitaciones o barreras existentes. Lo anterior representa al mismo tiempo un progreso en la transición hacia una BEC.

Se demostró que un bioproceso como el compostaje para el tratamiento de la FORSU resulta en alto nivel de circularidad de material (ICM = 1) al evitar que esta fracción llegue intacta a la disposición final en relleno sanitario, sin embargo, debe verificarse si también resulta eficiente en función de sus impactos ambientales y económicos.

Este estudio proporciona información útil para la conformación de un marco conceptual de indicadores que favorezca la articulación de la BEC a través de

una evaluación integral de los aspectos materiales, energéticos y socioeconómicos de los materiales biomásicos como la FORSU y los productos resultantes de su procesamiento. Además, expone la necesidad de generar índices representativos del aprovechamiento biotecnológico de la FORSU que permitan evaluar la circularidad de materiales y energías en las etapas de diseño, desarrollo y ciclo de vida completo.

Con la existencia de un marco de indicadores para la BEC se busca dotar de herramientas a investigadores, industriales, inversionistas y responsables de la toma de decisiones para: i) caracterizar y definir el panorama actual de la BEC, ii) contribuir con la evaluación del desempeño y eficiencia de los procesos de manufactura existentes y futuros que utilizan biomasa, iii) fortalecer las decisiones ya tomadas por los gobiernos y en su caso tomar medidas correctivas y iv) avanzar en la visión holística de la gestión de los recursos que incentive la sostenibilidad.

### AGRADECIMIENTOS

Paul García Bucio agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca número 295708 para estudios de posgrado.

### ABREVIATURAS

10R	Estrategia de las 10R para gestión de residuos
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ARTS	Average Residence Time in Society
BEC	Bioeconomía circular
C2C	Marco de la cuna a la cuna (Cradle-to-Cradle)
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental, México-EUA-Canadá
CEE	Consumo Energético Específico
CEI	Índice de economía circular, o Circular Economy Index por su sigla en inglés
CEP	Desempeño de economía circular, o Circular Economy Performance por su sigla en inglés
CEV	Relación ecoeficiencia-valor, por su sigla en inglés
CIRAIG	Centro Internacional de Referencia para el Ciclo de Vida de Productos, Procesos y Servicios de Canadá, por su sigla en inglés
CMUR	Tasa de uso circular de materiales, o (Circular Material Use Rate)
CNP	Circularidad a Nivel Producto
CPI	Índice de desempeño de economía circular, (Circular Economy Performance Indicator)
CV	Ciclo de vida
Dm	Desmaterialización (Dematerialization)

DEC	Desempeño en Economía Circular
EC	Economía circular CE Circular economy
EDIM	Índice de facilidad de desensamblado o de sarmado, (Ease of Disassembly Metric)
EDM	Entrada Directa de Materiales
EE	Eficiencia energética (Energy efficiency)
EEN	Energía incorporada, (Embodied energy)
EFG	Empleos Formales Generados
EI	Intensidad de energía, (Energy Intensity)
EIN	Energía Incorporada
EM	Eficiencia del Material
EMF	Fundación Ellen MacArthur
ER	Eficiencia de Reciclaje
EVR	Razón de valor ecoeficiente, (Eco-Efficient Value Ratio)
FDP	Facilidad de Desmontaje del Producto
FE	Empleo formal, (Formal employment)
ICM	Indicador de Circularidad de Material
ICS	Índice Circular Sostenible
IDEC	Indicador de Desempeño en Economía Circular
IE	Intensidad Energética
IEC	Índice de Economía Circular
IFL	Indicador de Flujo Lineal
IP	Inclusión de proveedores
IPR	Indicador de Potencial de Reúso
IRM	Indicador de Reutilización de Material
L	Longevidad, o Longevity
LCA	Análisis de ciclo de vida, (Life Cycle Assessment)
LFI	Índice de flujo lineal, (Linear Flow Index)
MCI	Índice de circularidad de materiales, (Material Circularity Indicator)
ME	Eficiencia de material, (Material Efficiency)
MRS	Puntaje de reutilización de materiales, (Material Reutilization Score)
NTU	Number of times used
NVU	Número de veces de uso del material
OFMSW	Fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, por su sigla en inglés
OSR	Tasa de recolección de desechos viejos, (Old Scrap Collection Rate)
PI	Parámetro de inclusión del proveedor, o Provider inclusivity, por su sigla en inglés
PLC	Nivel de circularidad del producto, (Product-Level Circularity)
RIR	Tasa de contribución de reciclaje, (Product-Level Circularity)
RPI	Indicador de potencial de reúso, (Reuse Potential Indicator)
RR	Tasa de eficiencia del proceso de reciclaje, (Recycling Process Efficiency Rate)
RTM	Requerimiento total de materiales
SCI	Índice de sostenibilidad (Sustainable Circular Index)

SEC	Specific Energy Consumption
TER	Tasa de Entrada a Reciclaje
TMR	Requerimiento total de material, o Total Material Requirement
TRMS	Tiempo Medio de Residencia en la Sociedad
TRR	Tasa de Recolección de los Residuos
UCM	Uso Circular del Material

## REFERENCIAS

- Ahlgren S., Björklund A., Ekman A., Karlsson H., Berlin J., Börjesson P., Ekvall T., Finnveden G., Janssen M. y Strid I. (2015). Review of methodological choices in LCA of biorefinery systems - key issues and recommendations. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(5), 606-619. <https://doi.org/10.1002/bbb.1563>
- Allwood J.M., Ashby M.F., Gutowski T.G. y Worrell E. (2011). Material efficiency: A white paper. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 362-381. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.002>
- Azevedo S., Godina R. y De Oliveira J. (2017). Proposal of a Sustainable Circular Index for Manufacturing Companies. *Resources*, 6(4), 63. <https://doi.org/10.3390/resources6040063>
- Bhaskar T., Pandey A., Rene E. y Tsang D. (2020). *Waste Biorefinery: Integrating Biorefineries for Waste valorisation*. 1 ed., Elsevier, 756 pp.
- Bleam W. (2017). Natural Organic Matter. *Soil and Environmental Chemistry*, (7) 333-384. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804178-9.00007-0>
- Braungart M. y Engelfried J. (1992). An "intelligent product system" to replace "waste management". *Fresenius Environ. Bull.*, 1(9), 613-619.
- Burgherr P. (2005). Survey of criteria and indicators. *New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS)*. Deliverable D.I.I. Stream research 2b, Paul Scherrer Institut.
- Carus M. y Dammer L. (2018). The Circular Bioeconomy - Concepts, Opportunities, and Limitations. *Industrial Biotechnology*, 14(2), 83-91. <https://doi.org/10.1089/ind.2018.29121.mca>
- C2CII (2014). Impacts of the cradle to cradle certified products program - Pilot study. En: *Cradle to Cradle Products Innovation Institute - Trucost report*. [en línea] <http://www.c2c-centre.com/library-item/impact-technical-report-03/10/2021>
- CCA (2017). Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte, informe sintético. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal. [en línea] <http://www3.cec.org/islandora/en/item/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf-03/03/2020>
- Cleveland C.J. y Ruth M. (1998). Indicators of Dematerialization and the Materials Intensity of Use. *Journal of Industrial Ecology*, 2(3), 15-50. <https://doi.org/10.1162/jiec.1998.2.3.15>
- Costanza R. (1980). Embodied energy and economic valuation. *Science*, 210(4475), 1219-1224. <https://doi.org/10.1126/science.210.4475.1219>
- Dahiya S., Kumar A.N., Shanthi-Sravan J., Chatterjee S., Sarkar O. y Mohan S.V. (2018). Food waste biorefinery: Sustainable strategy for circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 248, 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.176>
- Devaney L. y Henchion M. (2018). Consensus, caveats and conditions: International learnings for bioeconomy development. *Journal of Cleaner Production* (174) 1400-1411. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.047>
- De Besi M. y McCormick K. (2015). Towards a Bioeconomy in Europe: National, Regional and Industrial Strategies. *MDPI Sustainability* (7) 10461-10478. <https://doi.org/10.3390/su70810461>
- Di Maio F. y Rem P.C. (2015). A Robust Indicator for Promoting Circular Economy through Recycling. *Journal of Environmental Protection*, 6, 1095-1104. <https://doi.org/10.4236/jep.2015.610096>
- EEA (2008). Developments in indicators: Total Material Requirement (TMR). En: *European Environment Agency Publications* [en línea] <https://www.eea.europa.eu/publications/signals-2000/page017.html-03/07/2020>
- Elia V., Gnoni M.G. y Tornese F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2741-2751. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.196>
- Eurostat (2018). Circular material use rate. Calculation method. En: *Statistical Office of the European Communities*. <https://doi.org/10.2785/132630>
- Farla J.C. y Blok K. (2001). The quality of energy intensity indicators for international comparison in the iron and steel industry. *Energy Policy*, 29(7), 523-543. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00148-8](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00148-8)
- Franklin-Johnson E., Figge F. y Canning L. (2016). Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance. *Journal of Cleaner Production*, 133, 589-598. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.023>
- Gehin A., Zwolinski P. y Brissaud D. (2008). A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. *Journal of Cleaner Production*, 16(5), 566-576. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.02.012>
- Georgescu-Roegen N. (1977). Inequality, Limits and Growth from a Bioeconomic Viewpoint. *Review of Social Economy*, XXXV(3), 361-375. <https://doi.org/10.1080/00346767700000041>
- Giannakitsidou O., Giannikos I. y Chondrou A. (2020). Ranking European countries on the basis of their

- environmental and circular economy performance: A DEA application in MSW. *Waste Management*, 109, 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.055>
- Ghisellini P., Cialani C. y Ulgiati S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *J. Clean. Prod.* 114, 11-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Goldman G. y Ogishi A. (2001). The Economic Impact of Waste Disposal and Diversion in California. A Report to the California Integrated Waste Management Board. <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.36109>
- Graedel T.E., Allwood J., Birat J.P., Buchert M., Hagelüken C., Reck B.K. y Sonnemann G. (2011). What do we know about metal recycling rates? *Journal of Industrial Ecology*, 15(3), 355-366. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x>
- Granta, EMF y LIFE-EU (2015). Circularity indicators. An approach to measuring circularity. Methodology. [en línea] <https://emf.thirdlight.com/link/3jtevhkukz-9of4s4/@/preview/1?o 19/03/2021>
- Haug R.T. (1993). The practical handbook of compost engineering. CRC Press. 752 pp.
- Hettiarachchi H., Ryu S., Caucci S. y Silva R. (2018). Municipal Solid Waste Management in Latin America and the Caribbean: Issues and Potential Solutions from the Governance Perspective. *Recycling*, 3(2), 19. <https://doi.org/10.3390/recycling3020019>
- Hodson E., Henry G. y Trigo E. (2019). Bioeconomy. New Framework for Sustainable Growth in Latin America. <https://doi.org/10.2307/j.ctvkwnpxt>
- Kalmykova Y., Sadagopan M. y Rosado L. (2018). Circular economy - From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation & Recycling* 135: 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>
- Kardung M., Cingiz K., Costenoble O., Delahaye R., Heijman W., Lovrić M. y Zhu B.X. (2021). Development of the Circular Bioeconomy: Drivers and Indicators. *Sustainability*, 13(1), 413. <https://doi.org/10.3390/su13010413>
- Kirchherr J., Reike D. y Hekkert M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127(September), 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Lagerkvist A. y Dahlén L. (2012). Solid Waste Generation and Characterization. En: R. A. Meyers, *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 10000-10013. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3\\_110](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_110)
- Lemos A.T., Ribeiro A.C., Fidalgo L.G., Delgadillo I. y Saraiva J.A. (2017). Extension of raw watermelon juice shelf-life up to 58 days by hyperbaric storage. *Food Chemistry*, 231, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.110>
- Lieder M., Asif F.M., Rashid A., Mihelič A. y Kotnik S. (2017). Towards circular economy implementation in manufacturing systems using a multi-method simulation approach to link design and business strategy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5-8), 1953-1970. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0610-9>
- Linder M., Sarasini S. y van Loon P. (2017). A Metric for Quantifying Product-Level Circularity. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 545-558. <https://doi.org/10.1111/jiec.12552>
- Lokesh K., Ladu L. y Summerton L. (2018). Bridging the Gaps for a ‘Circular’ Bioeconomy: Selection Criteria, Bio-Based Value Chain and Stakeholder Mapping. *Sustainability* 2018, 10(6), 1695-1719. <https://doi.org/10.3390/su10061695>
- Maina S., Kachrimanidou V. y Koutinas A. (2017). A roadmap towards a circular and sustainable bioeconomy through waste valorization. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 8, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.07.007>
- Matsumo Y., Daigo I. y Adachi Y. (2007). Application of Markov chain model to calculate the average number of times of use of a material in society: An allocation methodology for open-loop recycling - Part 2: Case study for steel. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(1), 34-39. <https://doi.org/10.1065/lca2006.05.246.2>
- Molina-Moreno V., Leyva-Díaz J.C., Llorens-Montes F.J. y Cortés-García F.J. (2017). Design of indicators of circular economy as instruments for the evaluation of sustainability and efficiency in wastewater from pig farming industry. *Water (Switzerland)*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/w9090653>
- Moraga G., Huysveld S., Mathieux F., Blengini G.A., Alaerts L., Van Acker K. y Dewulf J. (2019). Circular economy indicators: What do they measure? *Resources, Conservation and Recycling*, 146(March), 452-461. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>
- Navare K., Muys B., Vrancken K.C. y Van Acker K. (2021). Circular economy monitoring – How to make it apt for biological cycles? *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105563. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105563>
- Niero M. y Kalbar P.P. (2019). Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. *Resources, Conservation and Recycling*, 140(July 2018), 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.002>
- Park J. y Chertow M.R. (2014). Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources. *Journal of Environmental Management*, 137, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.053>
- Pauliuk S. (2018). Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001:2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.019>

- Potting J., Hekkert M., Worrell E. y Hanemaaijer A. (2017). Circular Economy: Measuring innovation in the product chain - Policy report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, (2544), 42. [en línea] [https://www.researchgate.net/publication/319314335\\_Circular\\_Economy\\_Measuring\\_innovation\\_in\\_the\\_product\\_chain](https://www.researchgate.net/publication/319314335_Circular_Economy_Measuring_innovation_in_the_product_chain) 24/03/2021
- Rodin V., Lindorfer J., Böhm H. y Vieira L. (2020). Assessing the potential of carbon dioxide valorisation in Europe with focus on biogenic CO<sub>2</sub>. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 41(2020), 101219 <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101219>
- Ronzon T. y M'Barek R. (2018). Socioeconomic Indicators to Monitor the EU's Bioeconomy in Transition. *MDPI Sustainability* 2018, 10, 1745; <https://doi.org/10.3390/su10061745>
- Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F. y Kendall A. (2018). A taxonomy of circular economy indicators, *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>
- Scheepens A.E., Vogtländer J.G. y Brezet J.C. (2016). Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: Making water tourism more sustainable. *Journal of Cleaner Production*, 114, 257-268. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.075>
- Tchobanoglous G. y Kreith F. (2002). *Handbook of solid waste management*. 2nd ed. McGrawHill. 834 pp.
- Thürer M., Tomašević I., Stevenson M., Qu T. y Huisingh D. (2018). A systematic review of the literature on integrating sustainability into engineering curricula. *Journal of Cleaner Production*, 181, 608-617. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.130>
- UN-Habitat. (2010). *Solid Waste Management in the World's cities*. En: Earthscan for and on behalf of the United Nations Human Settlements Programme. <https://doi.org/10.1002/0471238961.solibagc.a01.pub2>
- Vanegas P., Peeters J.R., Cattrysse D., Tecchio P., Ardente F., Mathieux F. y Duflo J.R. (2018). Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. *Resources, Conservation and Recycling*, 135(January 2017), 323-334. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.022>
- Vea E.B., Martínez-Sánchez V. y Thomsen M. (2018). A review of waste management decision support tools and their ability to assess circular biowaste management systems. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10), 40-60. <https://doi.org/10.3390/su10103720>
- Viaggi D. (2018). The bioeconomy: delivering sustainable green growth. En: *The bioeconomy: delivering sustainable green growth*. <https://doi.org/10.1079/9781786392756.0000>
- Walmsley T.G., Ong B.H.Y., Klemeš J.J., Tan R.R. y Varbanov P.S. (2019). Circular Integration of processes, industries, and economies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107(January), 507-515. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.039>
- Worrell E., Price L., Martin N., Farla J. y Schaeffer R. (1997). Energy intensity in the iron and steel industry: A comparison of physical and economic indicators. *Energy Policy*. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(97\)00064-5](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(97)00064-5)
- Zhang C., Chen W.Q. y Ruth M. (2018). Measuring material efficiency: A review of the historical evolution of indicators, methodologies and findings. *Resources, Conservation and Recycling*, (132), 79-92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.028>