

Reflexiones teóricas e hipótesis de economía circular para la reducción de residuos

Theoretical reflections and hypotheses of circular economy for waste reduction

Sergio Gabriel Ceballos Pérez^{1*}, Ramiro Flores-Xolocotzi²

¹ División de Investigación, Innovación y Posgrado, Universidad Politécnica de Pachuca. Zempoala, Hidalgo, México. CP. 43820.

Tel. 771 5477 510 al 520, sgceballospe@secihti.mx

² Unión de Investigadores para la Sustentabilidad.

*Autor de correspondencia

Resumen

Palabras clave:

Economía circular;
modelos; teoría;
indicadores.

Frente al aumento acelerado de residuos, la economía circular (EC) representa una alternativa que puede transformar los procesos productivos y de consumo. No obstante, a pesar del auge de la EC, no hay claridad conceptual ni teórica. Este trabajo se plantea como objetivos: identificar y clarificar la teoría económica detrás de la EC; generar un modelo de EC propio; y proponer hipótesis económicas, ambientales y sociales que puedan ser contrastadas en investigaciones posteriores. Como metodología se llevó a cabo una revisión crítica de literatura basada en el método de bola de nieve, con el cual se revisaron 143 artículos mediante un motor de búsqueda de artículos científicos. Como resultados se obtuvieron la identificación de tres modelos económicos básicos junto con sus limitantes para interpretarlos correctamente, la generación de un modelo propio y la propuesta de hipótesis e indicadores nuevos que podrán ser probados en estudios posteriores.

Abstract

Keywords: Circular economy; models; theory, indicators.

In the face of rapidly increasing waste, circular economy (CE) represents an alternative that can transform production and consumption processes. However, despite the rise of CE, there is no conceptual and theoretical clarity. This work aims to identify and clarify the economic theory behind CE; generate a CE model; and propose economic, environmental, and social hypotheses that can be tested in subsequent research. The methodology used was a critical literature review based on the snowball method, through which 143 articles were reviewed using a scientific article search engine. Results included the identification of three basic economic models along with their limitations for correct interpretation; the generation of a CE model; and the proposal of new hypotheses and indicators that can be tested in subsequent studies.

Recibido: 15 de febrero de 2025

Aceptado: 14 de octubre de 2025

Publicado: 18 de febrero de 2026

Cómo citar: Ceballos, S. G.; & Flores-Xolocotzi, R. (2026). Reflexiones teóricas e hipótesis de economía circular para la reducción de residuos. *Acta Universitaria*, 36, e4520. doi. <https://doi.org/10.15174/au.2026.4520>

Introducción

Recientemente, diversas disciplinas científicas como la economía, la demografía y la ecología han abordado la posibilidad de reducir los residuos generados por el consumo y la producción (Oladipo & Okon, 2018; Rovenskaya, 2010). Entre las perspectivas teóricas actuales, destaca el campo de la economía circular (EC) (Calisto *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2020; Negrei & Istudor, 2018; Smol *et al.*, 2020). Este campo de la economía, aun cuando es una teoría joven y en proceso de construcción, desde una perspectiva multidisciplinar, permite abordar el problema de la gestión y tratamiento de los residuos desde un enfoque de prevención, reciclaje y valoración para ser reintroducidos en los procesos productivos y de consumo (Jögi & Bhat, 2020; Kirchherr *et al.*, 2017).

De acuerdo con González (2019), la EC busca la reducción de residuos por medio de diferentes vías y acciones, como la valorización de estos en la etapa de disposición final por medio del reciclaje, la reutilización, la producción de biogás, la incineración o el compostaje, entre otras (López, 2018; Manzi *et al.*, 2020). De esta forma se tiene un impacto en las etapas de producción industrial, haciendo que los materiales, energía y agua puedan ser reutilizables, biodegradables, de larga duración o reparables (Hadley *et al.*, 2020; Plastinina *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2019).

Por su parte, desde la perspectiva tradicional de los residuos, una de sus debilidades es que estos solo se reconocen en la etapa final de los procesos. Son como un mal público que es trasladado desde los agentes económicos hasta el medioambiente, el cual al final asume el costo económico y ambiental de dicha contaminación (Fullerton, 2024; Sikor *et al.*, 2017). No obstante, desde el enfoque de la EC esta perspectiva cambia, ya que permite identificar a los residuos como materiales reutilizables, subproductos y bienes para la generación de nuevo valor, lo cual evita que lleguen grandes cantidades de residuos al vertedero (Heshmati, 2017; Jögi & Bhat, 2020; Stegmann *et al.*, 2020).

Igualmente, la EC evidencia que las actividades ambientales a favor de la economía, además de ser diversas, se pueden encontrar a lo largo de todo el sistema y el ciclo económico (Taleb & Al Farooque, 2021). En la Figura 1 se observa el complejo sistema económico visto de una forma simple, donde las actividades económicas dependen de los ecosistemas, recursos naturales y servicios ambientales. En ellas, hay actividades primarias y extractivas que dotan de materias primas a las industrias y proveen de alimentos a los hogares (Oladipo & Okon, 2018; Rovenskaya, 2010). Además, se encuentra el sector servicios, el cual puede ser público o privado, así como el consumo final de los hogares. No obstante, las acciones de la EC están presentes en cada actividad de principio a fin y se hacen transversales por cada una de ellas (Duarte *et al.*, 2021; Harris *et al.*, 2021; Yong, 2007).

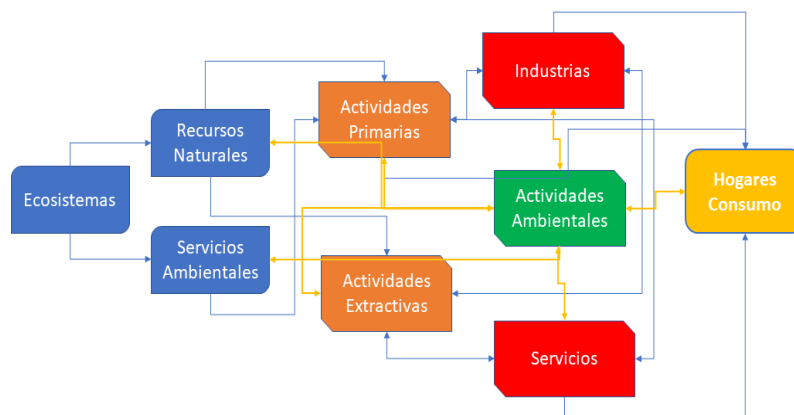


Figura 1. Ciclo económico con actividades económico-ambientales de economía circular.

Fuente: Elaboración propia.

La EC es una alternativa para reducir el crecimiento de los residuos y los impactos negativos que estos generan (Duarte *et al.*, 2021), por ejemplo, las emisiones de gases de efecto invernadero; la contaminación de suelos, mantos acuíferos y aguas marinas; la fauna nociva; la invasión de espacios, entre otros (Chadar & Keerti, 2017; Chen *et al.*, 2020; Cheng *et al.*, 2019).

Por otra parte, la EC representa una oportunidad para proponer nuevas formas de producción y de consumo, buscando reducir la generación de residuos mediante la reutilización, el rediseño, la recuperación y el reciclaje de materiales, así como fomentar un uso racional de los recursos y un consumo consciente de ellos (Chen *et al.*, 2020; Negrei & Istudor, 2018; Smol *et al.*, 2020).

Aun así, una crítica constante a la EC es la ausencia de un marco teórico económico sólido y concreto y la falta de hipótesis que sean contrastadas empíricamente desde una perspectiva económica, ecológica y social (Calisto *et al.*, 2020; Prieto-Sandoval *et al.*, 2018). Es por ello que este artículo tiene por objetivos: 1) identificar la teoría económica detrás de la EC, 2) generar un modelo de EC propio y 3) proponer hipótesis de EC que puedan ser contrastadas en investigaciones posteriores.

Materiales y métodos

La estructura metodológica del artículo se basa en una revisión crítica de la literatura sobre EC, la cual se utilizó para identificar modelos o teorías económicas relacionadas con la EC y las brechas conceptuales (Calisto *et al.*, 2020). Además, esta revisión sirvió para identificar las diferentes corrientes teóricas en las que se estudia la EC y las variables utilizadas para ello (Heshmati, 2017; Petit-Boix & Leipold, 2018; Taleb & Al Farooque, 2021). Una vez realizado esto, se analizó la información y se categorizó para elaborar un modelo propio de EC, del cual se pudieron desprender hipótesis provenientes de las variables seleccionadas (Figura 2).

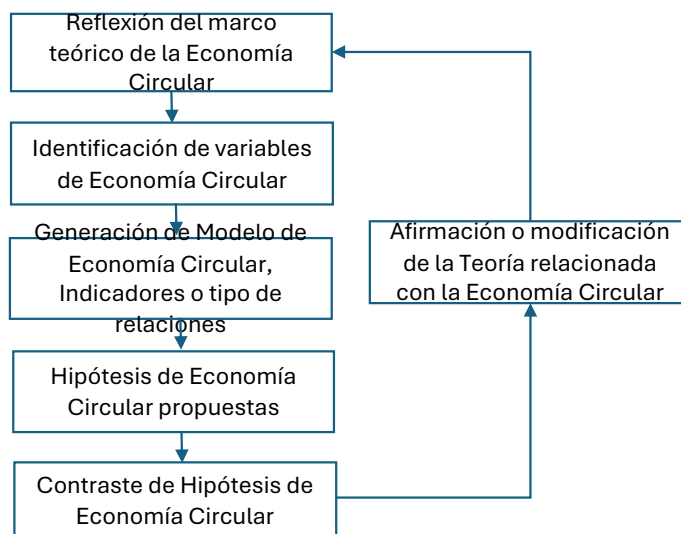


Figura 2. Revisión sistemática bibliográfica de economía circular.

Fuente: Elaboración propia.

Para la revisión crítica se realizó un muestreo no probabilístico, tipo bola de nieve, de artículos científicos relacionados con EC, mediante la plataforma Mendeley, utilizando como palabras clave: "circular economy", "concept", "theory" y "variables" (La búsqueda se realizó en inglés debido a que la mayoría de los documentos se encuentran en inglés; no obstante, también se seleccionaron documentos en español.) Así mismo, se determinaron los siguientes criterios de búsqueda: periodo: 2016 a 2024; tipo de documentos: artículos, presentaciones en congresos, tesis y capítulos de libro; idioma: inglés y español. El método puede verse con mayor detalle en la Figura 3.

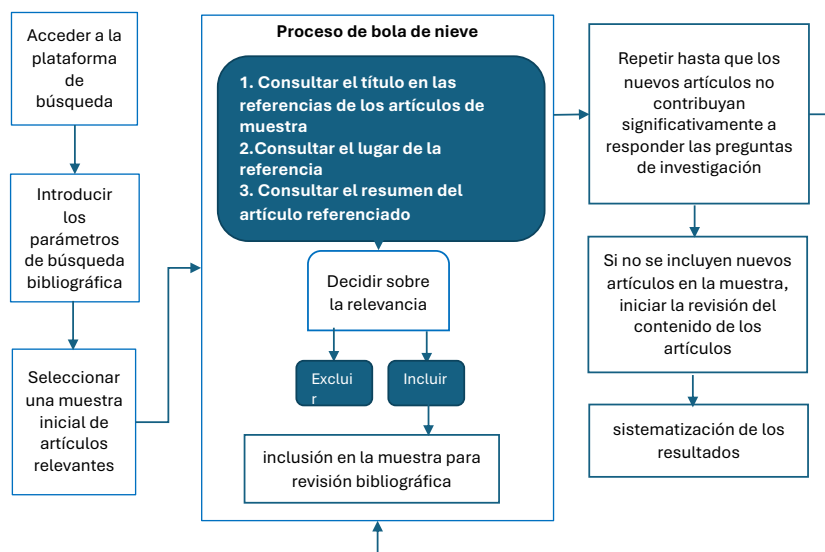


Figura 3. Método para revisión bibliográfica tipo bola de nieve.

Fuente: Elaboración propia con base en Geissdoerfer *et al.* (2017).

A partir de dicha consulta, se seleccionaron de forma inicial siete artículos (Tabla 1) que por su contenido teórico conceptual o metodológico relacionado con la EC contribuyeron a:

- a) Considerar una muestra no probabilística de artículos relevantes para los objetivos del trabajo.
- b) Identificar y analizar algunos campos teóricos de la EC.
- c) Iniciar un proceso muestral tipo bola de nieve. Este proceso consistió en localizar las referencias bibliográficas citadas dentro de los artículos seleccionados inicialmente y que, por sus aportaciones, pudieran ser de interés para esta investigación.
- d) Localizar las referencias. Para esto se leyó el resumen del artículo referenciado y se analizó su relevancia para los fines del trabajo, y con ello se decidió excluirlo o incluirlo para una segunda fase de revisión.

Tabla 1. Selección de una muestra inicial no probabilística de artículos de EC.

Autor(es)	Conceptual	Teoría	Modelos	Variables e Hipótesis	Corriente teórica o disciplina	Resumen hallazgos
Corvellec <i>et al.</i> (2022)	X	-	-	-	Sociología (análisis del discurso)	Límites difusos, fundamentos teóricos poco claros, críticas ideológicas
Morseletto (2020)	-	X	X	-	Planificación y políticas públicas	Los objetivos planteados de la EC por medio de las 10R's, no se cumplen del todo, por lo que es necesario replantear algunos de ellos.
Kirchherr <i>et al.</i> (2017)	X	X	-	-	Evaluación sistemática de definiciones	La economía circular se describe frecuentemente como una combinación de actividades más que de una forma teórica.
Prieto-Sandoval <i>et al.</i> (2018)	X	X	-	-	Revisión sistemática	Búsqueda de consensos sobre la conceptualización de la EC de diferentes estudios, introduce la variable de innovación como fundamental.
Velenturf & Purnell (2021)	X	X	-	-	Sistemas ecológicos	Se analizan las prácticas de la EC, y se identifican algunas que no resultan ambientalmente sanas. Se propone un marco de valores y principios para el diseño, la implementación y la evaluación de una economía circular sostenible
Patwa <i>et al.</i> (2021)	-	X	X	X	Comportamiento del consumidor, estadísticas de primera mano	Se plantea un modelo de EC para países emergentes y analiza el comportamiento y la propensión de los consumidores
Skare <i>et al.</i> (2023)	-	X	X	X	Econometría	Se probaron 8 hipótesis: Inversión bruta en EC, Valor agregado, tasas de reciclaje de vidrio, plástico, biorresiduos, tasa de recuperación de materiales, costo de los factores, entre otros, mediante técnicas econométricas, 5 se rechazaron.

Fuente: Elaboración propia.

Los artículos incluidos se revisaron y leyeron a profundidad. Así se continuó con un proceso iterativo que se detuvo una vez que se obtuvo soporte teórico y técnico para:

- Construir un modelo teórico de EC vinculado a la reducción de residuos.
- Identificar tópicos de investigación de la EC dentro del contexto de los residuos.
- Obtener hipótesis económicas-sociales del modelo de EC y que, desde un enfoque de crecimiento poblacional/económico y de ecoeficiencia (densidad poblacional, urbanización), fundamentaran y analizaran su asociación con los residuos.

Al final de esta fase, se ordenó y analizó toda la información, estructurándola en los siguientes apartados (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados de la búsqueda en Mendeley (2016-2024).

Proceso de búsqueda, revisión o descarte	Número de documentos
Documentos publicados con la palabra clave: Circular economy	50 955
Documentos publicados con la palabra clave: Circular economy concept	13 492
Documentos publicados con la palabra clave: Circular, economy, theory	6721
Documentos publicados con la palabra clave: Circular, economy, theory, hypothesis	197
Documentos seleccionados de la Muestra No probabilística	7
Documentos seleccionados de las referencias	83
Documentos rechazados	22
Documentos revisados	61
Documentos revisados a profundidad	24

Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

Modelos teóricos de la economía circular

Una de las críticas a la EC es la aparente falta de un marco teórico económico claro. En este apartado se presentan algunos de los modelos y teorías basados en las dos escuelas principales de la economía relacionadas con el medioambiente, con el fin de demostrar que sí existe un marco teórico de EC, aunque lo que probablemente falta es desarrollarlo y difundirlo.

La EC tiene sus antecedentes en la economía ambiental y la economía ecológica (Velenturf & Purnell, 2021). En la economía ambiental se encuentran los modelos de crecimiento económico sustentable derivados del modelo de Solow-Swan, conocidos también como modelos verdes de Solow (Brock & Taylor, 2010). Dichos modelos parten de la teoría del bienestar, en ellos la contaminación es vista como un mal público y se reduce el bienestar del consumidor (Klein, 1983; Pearce, 1985).

El modelo de crecimiento verde se basa en dos variables básicas: capital K y trabajo L , como se observa en la siguiente ecuación Cobb-Douglas (ecuación 1), donde A es un factor tecnológico visto de forma constante y α es el factor del capital de la función de producción Y , delimitado entre 0 y 1.

$$Y_t = AK_t^\alpha L_t^{1-\alpha} \quad (1)$$

La ecuación fundamental del modelo de Solow (ecuación 2) se obtiene mediante una serie de sustituciones al momento de incorporar el ahorro s , la depreciación del capital d y el crecimiento poblacional n , los cuales son constantes. Se debe tener en cuenta algunas condiciones y simplificaciones, tales como que la función presenta rendimientos constantes a escala, que la productividad marginal de los factores es positiva -pero decreciente-, y que la inversión es igual al ahorro.

$$\dot{k}_t = sAk_t^\alpha - (\delta + n)k_t \quad (2)$$

En esta ecuación, k es el capital per cápita, el cual resulta de la diferencia entre el ahorro per cápita s y la inversión necesaria para reponer el capital per cápita que se deprecia de forma constante (Del Pozo, 2020). Esta condición permitió llegar a Solow a explicar el estado estacionario donde el capital y la producción de equilibrio se encuentran definidos como (ecuación 3 y 4):

$$k^* = \left[\frac{s_t A_t}{(n_t + \delta_t)} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad (3)$$

$$y_t^* = A_t^{\frac{1}{1-\alpha}} \cdot \left[\frac{s}{n+\delta} \right]^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \quad (4)$$

Hasta este punto, el modelo de crecimiento de Solow es el modelo básico, que analiza el vínculo de las tasas de ahorro e inversión con el estado estacionario. Para introducir el impacto ambiental y su relación con el crecimiento económico, se requiere añadir la siguiente relación (ecuación 5):

$$P_t = T_t Y_t^\gamma L_t^{1-\gamma} \quad (5)$$

donde P representa la contaminación determinada en el periodo t , la cual se encuentra en función de T , que es una constante definida como un factor de contaminación promedio; Y , que es el nivel de producción de la economía; y L , que es la población. Del Pozo (2020) utiliza esta identidad para determinar las emisiones de dióxido de carbono, utilizando E en lugar de P ; sin embargo, en el caso de la EC, P se puede definir como la generación de residuos, la cual se encuentra en función del nivel de producción y el tamaño de la población. De esta ecuación se puede desprender la emisión de residuos per cápita (p) y el producto per cápita (y) al dividirlo entre la población (L) (ecuación 6).

$$p_t = T_t y_t^\gamma \quad (6)$$

Al momento de diferenciar las variables respecto al tiempo y aplicar logaritmos, se puede obtener la elasticidad de la contaminación ambiental respecto al crecimiento económico (ecuación 7):

$$\frac{\dot{p}_t}{p_t} = \frac{\dot{T}_t}{T_t} + \gamma \frac{\dot{y}_t}{y_t} \quad (7)$$

Modelo de crecimiento verde con materias primas

Ibarra (2013) desarrolló un modelo de crecimiento verde a partir del modelo de Solow-Swan, introduciendo la variable materias primas (Mp), lo que permite analizar la generación de residuos y la EC por medio de las R (reciclaje, reducción, recuperación, reparación, entre otros). El modelo parte de la premisa de que la producción depende de las materias primas disponibles en cada economía, las cuales se componen de materias primas vírgenes (Mpv) y materias recicladas (Mpr), reutilizadas, recuperadas, etc., además del trabajo y del capital (ecuación 8). La contaminación en este modelo son los residuos generados a partir de los procesos productivos y del consumo final; en ese sentido, la materia prima disponible se puede definir como Mpd igual a la suma de la materia prima virgen (Mpv) más la materia recuperada, la reutilizada, el reciclaje, etcétera, (Mpr), menos los residuos sólidos finales que van al vertedero (Rs) (ecuación 9).

$$Mp = Mpv + Mpr \quad (8)$$

$$Mpd = Mpv + Mpr - Rs \quad (9)$$

En su modelo, Ibarra (2013) considera únicamente el reciclaje; sin embargo, el modelo se puede utilizar para la EC como una actividad que contribuye a la reducción de la contaminación, es decir, a la reducción de residuos de disposición final. En este modelo, al introducir políticas de EC, habrá un incremento en la disponibilidad de materia prima y un menor nivel de emisiones de residuos finales a causa de la reutilización de los desperdicios generados en el proceso productivo. Esto se reflejará en un mayor nivel de capital derivado de mantener la tasa de ahorro en la economía constante; la EC genera un desplazamiento de la función de producción, lo cual puede asemejarse a un cambio tecnológico. Como resultado, el capital *per cápita* aumenta en la fase estacionaria, y el nivel de contaminación disminuye (Ibarra, 2013).

Así, la función de producción en el modelo a nivel agregado se muestra en la ecuación 10, donde Y es el producto total, L la mano de obra, K el capital utilizado, y Mp las materias primas disponibles en la economía. A nivel per cápita, las variables son las mismas, pero se muestran en minúsculas. La mano de obra, al momento de dividir por L y factorizar, se vuelve una constante de valor 1 (ecuación 11); las sustituciones y el álgebra para simplificar las ecuaciones se pueden revisar en Ibarra (2013):

$$Y = F(L, K, Mp) \quad (10)$$

$$y = f(k, m) \quad (11)$$

Modelo de capital natural y crecimiento sustentable

La EC tiene como objetivo reducir la disposición final de residuos per cápita, lo cual involucra aligerar la carga de degradación de la materia por parte de los ecosistemas mediante los ciclos naturales. Este servicio representa, a su vez, el mantenimiento de la naturaleza o de los ecosistemas en buena condición; algunos lo definen como calidad ambiental, otros como capital natural (Cohen *et al.*, 2019).

Rodríguez & Ruiz (2001), al analizar los modelos de crecimiento, encuentran que la naturaleza se encontraba en las propuestas teóricas de Adam Smith y David Ricardo; sin embargo, se les consideraba como variables exógenas o como constantes, es decir, no se tomaba en cuenta el impacto del crecimiento económico en el capital natural, ni la necesidad del capital natural dentro del crecimiento económico. En palabras de Rodríguez & Ruiz (2001), tanto el capital natural (K_n) como el capital físico o capital manufacturado (K_m) rinden un ingreso que se define como "la cantidad máxima que una comunidad puede consumir en un periodo dado y permite continuar consumiendo al menos la misma cantidad al final del periodo". Esta es una forma clara de definir sustentabilidad mediante el acervo de capital natural disponible, el cual debe rendir al menos el mismo flujo de ingreso del periodo siguiente, de acuerdo con la carga del crecimiento poblacional.

En otras palabras, el acervo de capital natural debe permanecer constante, de lo cual se deriva la siguiente duda: ¿Cuál debe ser el nivel de consumo que permite conservar determinado acervo de K_n necesario? Sobre esta pregunta, Barbier & Markandya (1993) diseñaron un modelo que busca identificar la ruta de crecimiento óptimo para una economía sujeta a las siguientes restricciones:

- 1) Extraer recursos naturales sin afectar sus tasas de recuperación.
- 2) Extraer recursos no renovables considerando los avances tecnológicos a tasas que permitan sustituirlos por recursos renovables.
- 3) Emitir residuos contaminantes en cantidades proporcionales a la capacidad regenerativa del ambiente.

Una vez descritas dichas condiciones, se propone una función de degradación ambiental S (ecuación 12) en donde las variables independientes son el flujo de residuos generados (W), la capacidad de asimilación del ecosistema (A), el flujo de recursos naturales extraídos (R), la capacidad regenerativa de los recursos naturales (G) y el flujo de recursos no renovables extraídos (E).

$$\dot{S} = f([W - A], [(R - G) + E]) \quad (12)$$

La ecuación representa el nivel de degradación ambiental. Por ejemplo, si $W > A$ y $R + E > G$, la degradación S aumenta debido al aumento en la cantidad de residuos netos generados y a la explotación de recursos naturales renovables y no renovables por encima de su tasa de recuperación o sustitución. Por otro lado, cuando $A = W$ y $R + E = G$, la degradación ambiental es igual a 0; sin embargo, eso no permite la recapitalización de la naturaleza, por tanto, en un horizonte de sustentabilidad, $A > W$ y $G > R + E$, lo cual permite aumentar el acervo de capital natural.

No obstante, la extracción de recursos naturales y la generación de desechos son funciones que dependen del nivel de consumo (C). En este modelo se encuentra a la EC vinculada con el consumo, específicamente en el uso indiscriminado de los recursos naturales, su capacidad de regeneración y la generación de residuos (ecuaciones 13 y 14).

$$W = w F(C) \quad (13)$$

$$R = r F(C) \quad (14)$$

$$E = e F(C) \quad (15)$$

Por su parte, la capacidad de asimilación y la regeneración se encuentran en función del acervo de capital natural disponible (K_n). En este modelo se considera la capacidad de regeneración de la naturaleza por sí misma propia, sin considerar el papel de la tecnología en su regeneración o recuperación ni el intercambio de capital natural por tecnología. Además, se definen los siguientes límites $K_n > K_m$ (ecuaciones 16 y 17).

$$A = a A(K_n) \quad (16)$$

$$G = g G(K_n) \quad (17)$$

Utilizando las ecuaciones 16 y 17, se puede reescribir la ecuación 12 de la degradación (S), en forma de tasa de cambio (ecuación 18), y la relación del acervo de capital natural (K_n) en función de la degradación (S) (ecuación 19).

$$\dot{S} = h(C, K_n) \quad (18)$$

$$\dot{K}_n = -aS = -ah(C, K_n) \quad (19)$$

Partiendo de aquí, se puede construir una función de utilidad para calcular el costo de oportunidad (C_{op}) entre el consumo y la calidad ambiental, en la que cada unidad de consumo sacrificada en el presente es igual al valor de la calidad ambiental futura descontada al valor presente. Considerando r como una tasa de preferencia positiva y t como el tiempo, la ecuación se resuelve maximizando la función de utilidad (ecuación 20) sujeta a la restricción presupuestaria definida por el mismo capital natural (ecuación 19) mediante el Hamiltoniano (ecuación 21).

$$C_{op} = e^{-rt} U(c, K_n) \quad (20)$$

$$H = e^{-rt} \{U(C, K_n) + P[-ah(C, K_n)]\} \quad (21)$$

Matriz de intercambio de materia y energía

Por último, la economía ecológica introdujo las cuentas de flujos de materias y energía, las cuales son indispensables para analizar la EC, pues en ella se puede contabilizar la materialización de la economía y el consumo de energía. Tradicionalmente, las cuentas económicas contabilizaban únicamente los flujos monetarios; no obstante, con las cuentas de materiales se presentan cantidades físicas de la economía. De esa forma se tiene una mayor precisión de la eficiencia, el desperdicio, la explotación de materiales, la entropía, el reciclado y la escasez, entre otros. Las cuentas de flujos de materiales y energía se presentan en las cuentas nacionales, de la cual se desprende el PIB verde, los cuadros de oferta y utilización, y la matriz insumo producto con análisis de materia, energía y reciclaje (ecuación 22) (González *et al.*, 2010).

$$X = [I - A]^{-1} * E \quad (22)$$

Estas matrices son una herramienta que también se utiliza para analizar la EC en distintos sectores, por la cantidad de materiales utilizados, la energía, las actividades de reciclaje, el nivel de residuos, la reutilización de materiales, entre otros.

Limitantes de los modelos de economía circular

La EC es un concepto que es abordado no solo por economistas, sino por diversas disciplinas, entre ellas, la ingeniería industrial y la ecología. Esto causa confusión respecto al origen del concepto de la EC, pues para algunos nació a partir de la economía ecológica (Georgescu-Roegen, 1971) debido a su contribución al análisis de los flujos de materia y energía por medio de las leyes de la termodinámica en las actividades económicas. En cambio, para otros la EC proviene de la economía ambiental al reconocer a Pearce (1985), quien fue uno de los primeros en describir a la naturaleza no solo como proveedora de insumos sino también de servicios ambientales para procesar la contaminación con determinados límites. Así se reconoce que la economía es un sistema complejo y no lineal como se planteaba.

Sin embargo, otras disciplinas como la ecología también han contribuido al origen del concepto de la EC al explicar, por ejemplo, que los servicios ambientales dependen de los ciclos biogeoquímicos y que los ecosistemas y los problemas ambientales están interconectados (Kirchherr *et al.*, 2017). Otras subdisciplinas como la ecología industrial se han adentrado en el análisis de los procesos productivos y la reducción de residuos, la reutilización de materiales, el reciclado y la utilización de energías renovables, desde la perspectiva tecnológica; no obstante, dejan de lado el análisis económico de dichos procesos (Wang *et al.*, 2018). La EC se nutre de diversas disciplinas al desarrollar estrategias, nuevas tecnologías, diseños prácticos y funcionales, entre otros, aunque eso no significa que su base teórica no sea la economía (Gerrits & Marks, 2015; Montagnini, 2017).

Por otro lado, la EC es un concepto que también emerge de la praxis de los actores económicos, a saber, empresas, consumidores, mercados o reguladores, que son quienes aplican la EC debido a los beneficios que les representa, por ejemplo, reducir sus emisiones contaminantes y mejorar sus ingresos, como se ve en los modelos anteriores (Heshmati, 2017; Van Engelenhoven *et al.*, 2021).

Cabe aclarar que al hablar de modelos económicos o de teoría económica hay dos enfoques. Uno se refiere a los modelos que describen la realidad económica, los cuales observan los fenómenos, las relaciones, los impactos, las variables, etcétera. Generalmente este es conocido como economía positiva. El otro se refiere a los modelos que proponen cambios a esa realidad imperfecta, tratando de guiarla hacia un estado con mayor bienestar, igualdad, crecimiento, sustentabilidad; es decir, se basa en algún principio moral existente a partir del cual se diseña uno o varios modelos. A ello se le conoce como economía normativa (Hausman, 2018).

Las limitantes de los modelos económicos, como en cualquier otro modelo, pueden ser distintas. Por ello, es importante establecer límites y alcances claros en el modelo o teoría con el cual se quiere analizar o resolver un problema (Miller *et al.*, 2023; Popper, 2005). En el caso de la EC, su objetivo principal es disminuir la cantidad de residuos al mínimo posible, tanto en lo personal como en el hogar, comercio, empresa, colonia, municipio, estado y país, lo cual contribuye a la sustentabilidad (Petit-Boix & Leipold, 2018; Taleb & Al Farooque, 2021).

No obstante, en los modelos presentados anteriormente existen limitantes a considerar para tener una interpretación adecuada. Por ejemplo, en el modelo verde de Solow se deben considerar los factores exógenos como la tecnología, los rendimientos constantes a escala y la capacidad de sustitución entre capital natural y la tecnología o la innovación, lo cual ofrece un marco de sustentabilidad delimitado por esas condiciones. Por su parte, las cuentas de flujo de materiales y energía no se han desarrollado completamente en México; no hay información disponible, por ejemplo, de tasas de reciclaje, volúmenes de aprovechamiento de residuos orgánicos, pérdida de calidad de materiales, tasas de recuperación de materiales o fuga de contaminantes. Asimismo, se debe considerar que no exista un doble conteo en los cálculos.

Identificación de variables de economía circular

La generación de residuos ha crecido aceleradamente debido a la rápida urbanización a nivel mundial, al aumento del ingreso per cápita y al crecimiento poblacional (Morseletto, 2020; Taleb & Al Farooque, 2021). De acuerdo con el análisis crítico realizado, en la generación de residuos se pueden identificar un gran número de variables de índole económica, urbana, poblacional y ambiental, que van desde costumbres, niveles de ingreso, nivel educativo, densidad poblacional, actividades económicas, políticas ambientales, variaciones de precios, servicios urbanos, tasas de crecimiento poblacional, género (Barrientos *et al.*, 2012; Flores-Xolocotzi & Ceballos, 2023; Hadley *et al.*, 2020; Van Engelenhoven *et al.*, 2021).

Las bases del modelo de EC desarrollado a partir de esta investigación se esquematizan en la Figura 4. Este modelo se puede relacionar con cuatro elementos fundamentales:

1. Variables de población: crecimiento demográfico, hábitos de consumo y sus acciones sobre el medioambiente.
2. Variables urbanas: densidad poblacional y grado de urbanización, infraestructura, nivel tecnológico, políticas urbanas.
3. Variables económicas: Son aquellas relacionadas con el ingreso y el crecimiento económico que pueden medirse en diferentes escalas, desde el nivel per cápita, el municipal o el nacional. Puede comprender, además, variables de oferta/demanda de productos, precios, impuestos o subsidios.
4. Variables ambientales: Se miden desde el grado de contaminación, la generación de residuos, los tipos de contaminantes y sus impactos, pero a su vez también se pueden medir las contenciones, es decir, las acciones a favor del ambiente y las políticas públicas de residuos.

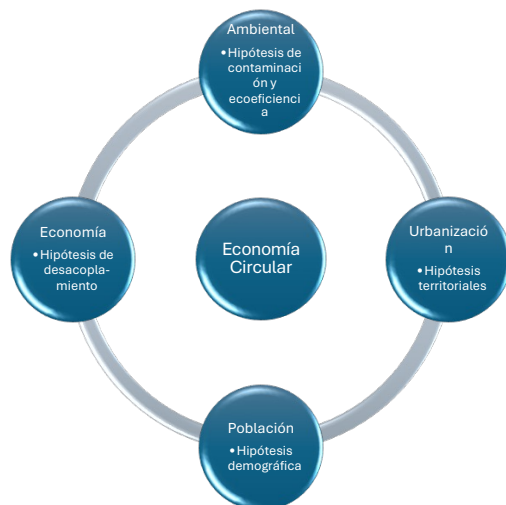


Figura 4. Modelo de economía circular y residuos sólidos urbanos.

Fuente: Elaboración propia.

Fases de la economía circular

Dentro del análisis crítico se identificó que existe una gran cantidad de procesos dentro de la EC y que pueden clasificarse en fases. Las fases de la EC son parte importante de los métodos de transformación y la transición hacia la sustentabilidad; se componen de cuatro etapas que inciden desde las decisiones de consumo hasta los procesos de valorización, para ser nuevamente empleadas en los procesos productivos o de consumo (Figura 5).

I. Fase de prevención de generación de residuos. Está relacionada con las decisiones de los agentes económicos que pueden incidir en contener o modificar las propensiones de consumo de productos para disminuir las tasas de generación de residuos, ya sea mediante la aplicación de instrumentos económicos -como impuestos, subsidios, fondos- o por medio de normas -como la responsabilidad extendida del productor, la innovación de materiales reciclables o biodegradables.

Así mismo, se agregan investigaciones psicológicas y económicas en esta fase, que sirven para identificar las características conductuales de las personas que permitirían incidir en la reducción del hiperconsumo de productos. Desde la psicología ambiental se ha encontrado que, como etapa de consumo y como agentes consumidores, se puede promover la prevención, la separación, la reducción y la reparación (Barrientos *et al.*, 2012; Benyam *et al.*, 2018). También sirve para identificar las posibles acciones de los agentes involucrados en las políticas públicas que ayudan a reducir al máximo posible los residuos hacia los vertederos, considerando el diseño de marcos legales, inversión pública, impuestos, subsidios (D'Amato *et al.*, 2017; Morsetto, 2020).

Por su parte, estudios económicos en esta etapa de prevención pueden determinar la forma en que el sistema de precios de servicios públicos relacionados con la recolección y el reciclaje de residuos podría acotar las tasas de generación de residuos en hogares (Gomes & Silva, 2020). En México, los costos por el servicio de recolección, separación y confinamiento representan una parte importante del presupuesto corriente de los municipios que se encargan de realizar este servicio, ya sea de forma directa o concesionada (Betanzo-Quezada *et al.*, 2016). Al respecto, en ciudades como Barcelona y Los Ángeles, California, se están aplicando impuestos y cobros especiales a la generación excesiva de residuos (Bányai *et al.*, 2019; Fernández-Aracil *et al.*, 2018).

II. Fase de Reutilización/Reciclaje. En esta fase, una vez que los residuos han sido recogidos, los materiales aprovechables son separados para ser reutilizados o reciclados y, posteriormente, ser vendidos a otras empresas que se dedican al acopio o a la transformación de los materiales para generar nuevos materiales o productos (Guibrunet, 2021). La diferencia principal es que reutilizar significa usar un objeto para el mismo o un nuevo propósito sin cambiar su forma, alargando su vida útil, mientras que reciclar es transformar un objeto usado en materia prima para crear productos completamente nuevos (Franceschelli *et al.*, 2019).

Dentro de esta fase es importante mencionar algunos aspectos importantes. El primero es que las empresas o fabricas productoras no se responsabilizan por los residuos que se generan, dicha responsabilidad pasa a manos de los consumidores, quienes son los encargados de separarlos y entregarlos al camión recolector o depositarlos en los recolectores disponibles para ello (Betanzo-Quezada *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2019). En México se requiere impulsar la responsabilidad ampliada para que las empresas asuman la responsabilidad y los costos de los residuos (Leal *et al.*, 2019). Una vez recogidos, la responsabilidad de los residuos pasa a manos de otra entidad, y así sucesivamente hasta llegar al confinamiento, valorización o reciclaje. Otro aspecto es que no todos los residuos tienen la facultad de ser reciclables, por lo que es necesario identificar cuál de ellos sí lo es para poder separarlo (Franceschelli *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2019).

Es importante señalar que el reciclaje es solo una actividad dentro de muchas otras que se pueden desarrollar en la EC, pero esta se encuentra limitada tanto por el tipo de material como por la segunda ley de la termodinámica referente a la "entropía". Esta ley fundamental establece que el desorden total del universo (o de un sistema aislado) nunca disminuye, por lo que los procesos naturales siempre tienden a un estado de entropía mayor. Es importante resaltar que no se han analizado a profundidad las implicaciones de esta ley física dentro de la economía, salvo por algunos autores como Georgescu-Roegen (1971) y Norbert Wiener (Montagnini, 2017). No obstante, su aplicación a la ciencia económica podría traducirse en restricciones operacionales, por ejemplo, rendimientos decrecientes del reciclaje (Martínez & Roca, 2013; Sobhee, 2004). Conceptos y fenómenos como obsolescencia, cambio climático y emisión de residuos tienen una relación muy estrecha con dicha ley, que analiza los comportamientos de la energía, el movimiento, los materiales, la degradación, el desorden y el caos (Díaz-Villavicencio *et al.*, 2017; Gerrits & Marks, 2015). Desde esa perspectiva, es importante tomar en consideración la primera etapa, que es la de prevención, en conjunto con las demás estrategias de reciclaje, reutilización y reducción (Barrientos *et al.*, 2012).

III. Fase de Valorización. Esta etapa consiste en el aprovechamiento de los residuos para generar nuevos subproductos, utilizándolos como materia prima e incluso generando bioenergía (González, 2019; Manzi *et al.*, 2020). Las actividades de valorización son también importantes dentro de la EC, ya que, a materiales no reciclables, se les puede buscar un nuevo uso (Richardson, 2012; Wang *et al.*, 2018; Watanabe *et al.*, 2019). La innovación, investigación y creatividad en esta fase son importantes, puesto que algunos materiales que pudieran parecer no reutilizables -como los materiales de construcción- podrían ser utilizados para rellenar espacios que requieren materiales o desechos agrícolas y para generar insumos, bioenergía o composta (López, 2018; Tsang *et al.*, 2019). La valorización de determinados desechos también tiene un aspecto económico, especialmente en industrias que han buscado la integración de sus residuos dentro de sus procesos productivos o la modificación de ellos para convertirlos en nuevos productos, lo cual no solo contribuye a disminuir el impacto ambiental, sino también a mejorar sus ingresos (D'Amato *et al.*, 2017; Manni *et al.*, 2019; Yun *et al.*, 2020).

IV. Fase de Confinamiento. Esta fase es la última etapa de los residuos, los cuales deben ser la mínima cantidad posible de acuerdo con la perspectiva de la EC (Gonçalves *et al.*, 2018; Khajuria *et al.*, 2010; Smol *et al.*, 2020). Hay un cambio de perspectiva respecto a que el suelo y el medioambiente pueden descomponer y regenerar todos los materiales utilizados sin importar su cantidad gracias a los procesos de degradación. Sin embargo, debido a la gran cantidad de estos, se generan problemas de saturación en los ecosistemas capaces de descomponerlos a su propio ritmo y, a largo plazo, esto podría provocar la destrucción de los mismos ecosistemas (Khajuria *et al.*, 2010; Sekhohola-Dlamini & Tekere, 2020). Con ello, se abren nuevas incógnitas por el tipo de residuos y contaminantes y por el aumento de residuos peligrosos que hay en los hogares, a los cuales no se les está dando el tratamiento adecuado (Chadar & Keerti, 2017; Cheng *et al.*, 2019). Tal es el caso de los residuos electrónicos, medicamentos, pilas o productos que han aumentado su demanda, como es el caso de los celulares y computadoras.

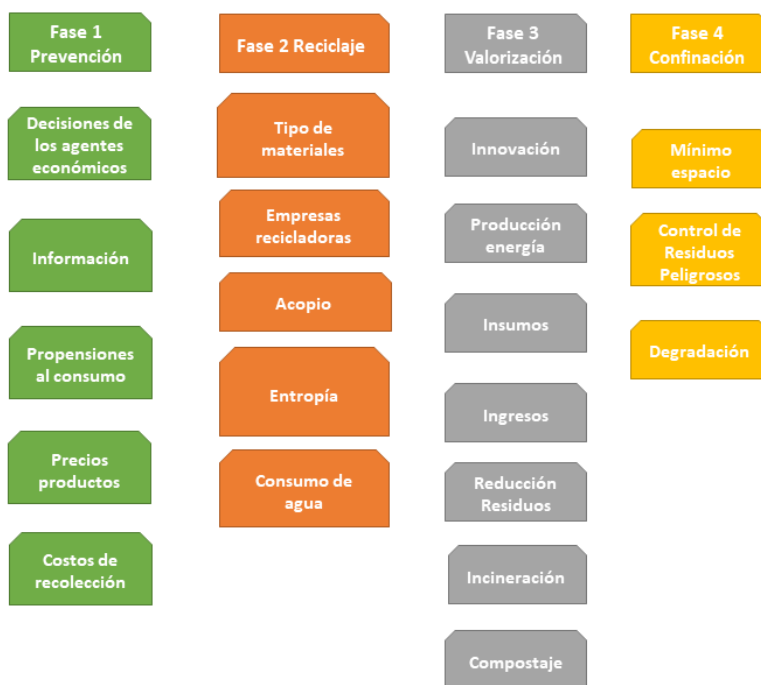


Figura 5. Actividades de economía circular por etapa.
 Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis basadas en economía circular

De acuerdo con los resultados de la revisión crítica, se encontró que existen algunas hipótesis e indicadores relacionados con la EC, tal es el caso de las hipótesis de la curva ambiental de Kuznets, la hipótesis del paraíso ambiental y de algunos indicadores como la generación de residuos sólidos urbanos per cápita, el porcentaje de reciclaje, la cobertura del servicio de recolección de residuos, el número de rellenos sanitarios vs. tiraderos a cielo abierto o el porcentaje de tratamiento de residuos (Ceballos & Flores, 2022; Hadley *et al.*, 2020; Van Engelenhoven *et al.*, 2021). No obstante, en México aún no se miden por completo indicadores propios de la EC, por ejemplo, porcentaje de reciclaje, porcentaje de materiales recuperados, porcentaje de reutilizados, porcentaje de residuos totales no recuperables, indicador de circularidad de materiales, demanda de activos ambientales.

Algunas empresas publican información en sus productos, tales como porcentaje de material reciclado y vida útil aproximada; no obstante, es importante contar con mayores hipótesis e indicadores que permitan tener una idea más clara del estado de la economía circular a distintas escalas. A continuación, se presentan algunos tópicos basados en Calisto *et al.* (2021) de los cuales se pueden desprender nuevos indicadores:

1. Entropía y biodiversidad. El pensamiento sistémico sobre entropía, tasas de emisión de residuos, el nexo entre materiales, energía y biodiversidad.
2. Impacto ambiental. Evaluación y valoración de los impactos de una EC.
3. Tópicos sociales. Gobernanza, justicia social y cambio cultural.
4. Aspectos psicológicos y conductuales. Prevención de emisiones de residuos
5. Tópicos económicos. La relación de las tasas de emisión de residuos con el crecimiento económico, el crecimiento poblacional, el mercado de bienes y servicios, la ecoeficiencia y un posible desacoplamiento.
6. Otros paradigmas. Visiones alternativas de circularidad.

Los anteriores desafíos requieren de mayores investigaciones y resultados para consolidar teóricamente a la EC. De ahí que sea necesario contrastar algunas hipótesis relacionadas con los procesos de gestión y manejo de los residuos, considerando los desafíos y tópicos propuestos como los de Calisto *et al.* (2021).

Por lo anterior, considerando la fase de prevención de RSU, esta investigación se enfocó en algunos tópicos económicos descritos en el punto 5 anterior. De ese quinto punto se pueden desprender las siguientes hipótesis:

1. Crecimiento poblacional y económico. Analiza la asociación de los RSU como indicador de impacto ambiental con una variable poblacional y con una variable de crecimiento económico (Brown *et al.*, 2014; Matušík & Kočí, 2021).

2. Ecoeficiencia. Analizar la asociación entre los RSU, como indicador de impacto ambiental, versus la densidad poblacional como indicador de eficiencia económica-ambiental (Bányai *et al.*, 2019; Díaz-Villavicencio *et al.*, 2017).

3. Desacoplamiento entre ingreso per cápita y generación de residuos per cápita, por medio del análisis de la curva de Kuznets, como un indicador de impacto ambiental de los agentes económicos (productor/consumidor) (Chen *et al.*, 2019; Madden *et al.*, 2019; Xiong *et al.*, 2018).

Conclusiones

La EC está contribuyendo activamente a mejorar la sustentabilidad de forma práctica; sin embargo, se desconoce la teoría económica que la sustenta, al igual que los límites y alcances que pueda tener. La EC tiene como fin reducir la cantidad de residuos provenientes de las actividades económicas y del consumo final, de lo cual se desprenden otros beneficios como la reducción de emisiones contaminantes, ahorro de recursos, mejoramiento de ingresos, innovación y aumento de empleo, etcétera.

Las limitantes teóricas de la EC se encuentran en los supuestos de cada modelo, las cuales es necesario considerar para poder interpretar cada modelo o teoría. Así mismo, existen otros factores más allá de las narrativas teóricas, a saber, limitantes tecnológicas, falta de marcos legales, falta de capacitación, escasa inversión, entre otros.

En cuanto al modelo de EC desarrollado, se identificaron cuatro grupos de variables: ambientales, económicas, urbanas y de población, entre las cuales se encuentran tamaño de población, densidad de población, género, tasas de crecimiento poblacional, educación, nivel de ingresos, gasto de los hogares, inversión, capital humano, crecimiento urbano, gasto público, emisiones de CO₂ y metano, residuos per cápita. Estas indican relaciones y formas de consumo, de producción, de conservación o contaminación.

Las fases de la EC son vitales para entender los procesos de la EC. Estas explican los grados de avance en la EC respecto al uso, consumo, reutilización, reducción de contaminación y cambios en los materiales. Ejemplos de lo anterior son la introducción de materiales reciclables, materiales biodegradables, cambios en las formas de consumo o en las normas, lo que impulsa la separación de residuos, el aprovechamiento, la valorización o la reutilización de residuos, incluso la creación de nuevos productos.

Se pretende que las hipótesis de crecimiento poblacional y económico, ecoeficiencia y desacoplamiento entre ingreso per cápita y generación de residuos, puedan ser probadas en estudios posteriores; sin embargo, existen evidencias de estudios previos sobre la curva ambiental de Kuznets (Ceballos & Flores, 2022), ecoeficiencia y crecimiento poblacional vs. crecimiento económico y su impacto en la generación de residuos sólidos urbanos (González, 2019). También existen algunos indicadores a nivel de industrias o de compañías, tales como el porcentaje de materia reciclada y virgen o la circularidad de determinadas materias primas.

Por último, la EC promueve un cambio desde la producción, el consumo y la gestión de residuos hacia un modelo regenerativo, el cual busca optimizar el aprovechamiento de los recursos y reducir el impacto ambiental. No obstante, a pesar de sus diferentes enfoques, estos marcos teóricos se complementan y comparten un objetivo común: promover estrategias y medios de vida sostenibles, adaptándose a las nuevas tecnologías y a la transición energética. Sin embargo, todavía existe una falta de comprensión más profunda sobre la EC y la sinergia de los distintos actores hacia una transición más justa.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias

- Bányai, T., Tamás, P., Illés, B., Stankevičiūtė, Ž., & Bányai, Á. (2019). Optimization of municipal waste collection routing: impact of industry 4.0 technologies on environmental awareness and sustainability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(4), 634. <https://doi.org/10.3390/ijerph16040634>
- Barbier, E. B., & Markandya, A. (1993). Environmentally sustainable development: optimal economic conditions. En Barbier, E. B. & Markandya, A. (eds.), *Economics and Ecology* (pp. 11-28). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1518-6_2
- Barrientos, C., Valadez, A., & Bustos, J. M. (2012). Efecto de la información sobre el conocimiento ambiental de separación de residuos en jóvenes universitarios. *Quaderns de Psicologia*, 14(1), 7-16. <https://doi.org/10.5565/rev/qpsicologia.914>
- Benyam, A., Kinnear, S., & Rolfe, J. (2018). Integrating community perspectives into domestic food waste prevention and diversion policies. *Resources, Conservation and Recycling*, 134, 174-183. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.019>
- Betanzo-Quezada, E., Torres-Gurrola, M. A., Romero-Navarrete, J. A., & Obregón-Biosca, S. A. (2016). Evaluation of municipal solid waste collection routes with support of satellite tracking devices: analysis and implications. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(3), 323-337. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.07>
- Brock, W. A., & Taylor, M. S. (2010). The Green Solow model. *Journal of Economic Growth*, 15, 127-153. <https://doi.org/10.1007/s10887-010-9051-0>
- Brown, L. R., Gardner, G., & Halweil, B. (2014). Beyond Malthus: The Nineteen Dimensions of the Population Challenge. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315071589>
- Calisto, M., Vermeulen, W. J. V., & Salomone, R. (2020). A typology of circular economy discourses: navigating the diverse visions of a contested paradigm. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104917. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104917>
- Calisto, M., Vermeulen, W. J. V., & Salomone, R. (2021). Analyzing European Union circular economy policies: words versus actions. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 337-353. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.001>
- Ceballos, S. G., & Flores, R. (2022). Una prueba de hipótesis de la curva ambiental de Kuznets para residuos sólidos urbanos en México, 1992-2018. *Revista de Economía*, 39(99), 54-82. <https://doi.org/10.33937/reveco.2022.275>
- Chadar, S., & Keerti, C. (2017). Solid waste pollution: a hazard to environment. *Recent Advances in Petrochemical Science*, 2(3), 41-43. <https://doi.org/10.19080/rapsci.2017.02.555586>
- Chen, D. M. C., Bodirsky, B. L., Krueger, T., Mishra, A., & Popp, A. (2020). The world's growing municipal solid waste: trends and impacts. *Environmental Research Letters*, 15(7), 074021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8659>
- Cheng, K. Y., Wong, P. Y., Whitwell, C., Innes, L., & Kaksonen, A. H. (2019). A new method for ranking potential hazards and risks from wastes. *Journal of Hazardous Materials*, 365, 778-788. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.059>
- Cohen, F., Hepburn, C. J., & Teytelboym, A. (2019). Is natural capital really substitutable?. *Annual Review of Environment and Resources*, 44, 425-448. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033055>
- Corvellec, H., Stowell, A. F., & Johansson, N. (2022). Critiques of the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 26(2), 421-432. <https://doi.org/10.1111/jiec.13187>
- D'Amato, D., Droste, N., Allen, B., Kettunen, M., Lähinen, K., Korhonen, J., & Toppinen, A. (2017). Green, circular, bio economy: a comparative analysis of sustainability avenues. *Journal of Cleaner Production*, 168, 716-734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>
- Del Pozo, C. (2020). *Modelos "verdes" de crecimiento económico* [Tesis]. Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/45818>

- Díaz-Villavicencio, G., Didonet, S. R., & Dodd, A. (2017). Influencing factors of eco-efficient urban waste management: evidence from Spanish municipalities. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1486–1496. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.064>
- Duarte, B., Scavarda, L. F., Gusmao, R. G., & Fuss, M. (2021). Improving urban household solid waste management in developing countries based on the German experience. *Waste Management*, 120, 772–783. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.001>
- Feola, G. (2024). Trampas de la economía circular. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, (13), 1-12. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202401.A005>
- Fernández-Aracil, P., Ortuño-Padilla, A., & Melgarejo-Moreno, J. (2018). Factors related to municipal costs of waste collection service in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 175, 553–560. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.116>
- Flores-Xolocotzi, R., & Ceballos, S. (2023). Desacoplamiento económico y generación de residuos sólidos en municipios turísticos de México. *Sociedad y Economía*, (49), e10412245. <https://doi.org/10.25100/sye.v0i49.12245>
- Franceschelli, M. V., Santoro, G., Giacosa, E., & Quaglia, R. (2019). Assessing the determinants of performance in the recycling business: evidence from the Italian context. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 26(5), 1086–1099. <https://doi.org/10.1002/csr.1788>
- Fullerton, D. (2024). *The circular economy* [working paper w32419]. National Bureau of Economic Research. <http://www.nber.org/papers/w32419>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm?. *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press. https://content.csbs.utah.edu/~lozada/Adv_Resource_Econ/En_Law_Econ_Proc_Cropped_Optimized_Clearscan.pdf
- Gerrits, L., & Marks, P. (2015). How the complexity sciences can inform public administration: an assessment. *Public Administration*, 93(2), 539–546. <https://doi.org/10.1111/padm.12168>
- Gomes, M. F., & Silva, V. K. (2020). Municipal taxes for the generation and collection of solid waste: differences and analysis of extrafiscal function. *Revista de Direito Da Cidade*, 12(4), 2623–2645. <https://doi.org/10.12957/rdc.2020.52550>
- Gonçalves, A., Moraes, F., Marques, G., Lima, J., & Lima, R. (2018). Urban solid waste challenges in the BRICS countries: a systematic literature review. *Revista Ambiente e Agua*, 13. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2157>
- González, A. C., Cañellas, S., Puig, I., Russi D., Sendra C., & Sojo A. (2010). El flujo de materiales y el desarrollo económico en España: un análisis sobre desmaterialización (1980-2004). *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 14(1), 33–51. <https://redibec.org/ojs/index.php/revibec/article/view/233>
- González, M. (2019). La valorización de los residuos reciclables y la sustentabilidad urbana. Una propuesta teórico-metodológica para su abordaje. *Revista I+A, Investigación Más Acción*, (22), 108–131. <https://revistasfaud.mdp.edu.ar/ia/article/view/346/229>
- Guibrunet, L. (2021). The interplay of tacit and explicit knowledge in the informal economy: the atypical case of a recycling family business in Mexico City. *International Development Planning Review*, 43(1). <https://doi.org/10.3828/idpr.2019.6>
- Hadley, E., Hartley, S., McLeod, C., & Polson, P. (2020). The sustainable path to a circular bioeconomy. *Trends in Biotechnology*, 39(6), 542–545. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.10.015>
- Harris, S., Martin, M., & Diener, D. (2021). Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 172–186. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.018>
- Hausman, D. M. (2018). The bond between positive and normative economics. *Revue d'Economie Politique*, 128, 191–208. <https://doi.org/10.3917/redp.282.0191>
- Heshmati, A. (2017). A review of the circular economy and its implementation. *International Journal of Green Economics*, 11(3–4), 251–288. <https://doi.org/10.1504/IJGE.2017.089856>

- Ibarra, D. (2013). El modelo de crecimiento económico Solow-Swan aplicado a la contaminación y su reciclaje. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(15), 08-24.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322013000100002&lng=es&tlng=es
- Jögi, K., & Bhat, R. (2020). Valorization of food processing wastes and by-products for bioplastic production. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 18, 100326. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100326>
- Khajuria, A., Yamamoto, Y., & Morioka, T. (2010). Estimation of municipal solid waste generation and landfill area in Asian developing countries. *Journal of Environmental Biology*, 31(5), 649-654.
https://jeb.co.in/journal_issues/201009_sep10/paper_16.pdf
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualización de la economía circular: un análisis de 114 definiciones. *Recursos, Conservación y Reciclaje*, 127, 221-232.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Klein, L. (1983). *La economía de la oferta y la demanda*. Fondo de Cultura Económica.
- Kumar, R., Bhattarai, D., & Neupane, S. (2019). Designing solid waste collection strategy in small municipalities of developing countries using choice experiment. *Journal of Urban Management*, 8(3), 386-395.
<https://doi.org/10.1016/j.jum.2018.12.008>
- Leal, W., Saari, U., Fedoruk, M., Iital, A., Moora, H., Klöga, M., & Voronova, V. (2019). An overview of the problems posed by plastic products and the role of extended producer responsibility in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 214, 550-558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.256>
- López, S. M. (2018). *Reutilización de residuos sólidos construcción con eco-ladrillos en un entorno rural educativo* [Tesis de Maestría]. Escuela de Ingenierías. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/4105>
- Madden, B., Florin, N., Mohr, S., & Giurco, D. (2019). Using the waste Kuznet's curve to explore regional variation in the decoupling of waste generation and socioeconomic indicators. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 674-685. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.025>
- Manni, A., El Haddar, A., El Amrani, I. E., El Bouari, A., & Sadik, C. (2019). Valorization of coffee waste with Moroccan clay to produce a porous red ceramic (class BIII). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 58(5), 211-220. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2019.03.001>
- Manzi, V., Rendón, L. I., Herrera, M., Gandini, M. A., & Marmolejo, L. F. (2020). Estado de la valorización de biorresiduos de origen residencial en grandes centros urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(3), 755-774. <https://doi.org/10.20937/rica.53341>
- Martínez, J., & Roca, J. (2013). *Economía ecológica y política ambiental*. FCE.
<https://storage.ejimdo.com/file/d938597f-ec74-4f0b-a66a-79d509ede1e9/Martinez%20Alier.pdf>
- Matušík, J., & Kočí, V. (2021). What is a footprint? A conceptual analysis of environmental footprint indicators. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124833. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124833>
- Miller, J. D., Elattar, O., & Bach, V. N. (2023). Método científico. En A. E. Eltorai, J. A. Bakal & B. D. Owens (eds.), *Translational sports medicine* (pp. 9-13). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91259-4.00098-9>
- Montagnini, L. (2017). Interdisciplinarity in Norbert Wiener, a mathematician-philosopher of our time. *Biophysical Chemistry*, 229, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.bpc.2017.06.009>
- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>
- Negrei, C., & Istudor, N. (2018). Circular economy - Between theory and practice. *Amfiteatru Economic*, 20(48), 498-509. <https://doi.org/10.24818/EA/2018/48/498>
- Oladipo, O., & Okon, E. (2018). Economic system and environment: co-composting effect of *Prosopis africana* and cow dung. *American Economic and Social Review*, 2(1), 52-66. <https://doi.org/10.46281/aesr.v2i1.154>
- Ortiz-Moctezuma, M., Pivovarchuk, D., Szolgayova, J., & Fuss, S. (2010). Dynamic systems, economic growth, and the environment. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-02132-9>
- Patwa, N., Sivarajah, U., Seetharaman, A., Sarkar, S., Maiti, K., & Hingorani, K. (2021). Towards a circular economy: an emerging economies context. *Journal of Business Research*, 122, 725-735.
<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.05.015>

- Pearce, D. (1985). *Economía ambiental*. Fondo de Cultura Económica.
- Petit-Boix, A., & Leipold, S. (2018). Circular economy in cities: reviewing how environmental research aligns with local practices. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1270-1281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.281>
- Plastinina, I., Teslyuk, L., Dukmasova, N., & Pikalova, E. (2019). Implementation of circular economy principles in regional solid municipal waste management: the case of Sverdlovskaya Oblast (Russian Federation). *Resources*, 8(2), 90. <https://doi.org/10.3390/resources8020090>
- Popper, K. R. (2005). *Conocimiento objetivo: un enfoque evolucionista*. Editorial Tecnos.
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 179, 605-615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>
- Richardson, B. (2012). From a fossil-fuel to a biobased economy: the politics of industrial biotechnology. *Environment and Planning C: Politics and Space*, 30(2), 282-296. <https://doi.org/10.1068/c10209>
- Rodríguez, L., & Ruiz, D. (2001). El concepto de capital natural en los modelos de crecimiento exógeno. *Análisis Económico*, 16(33), 109-128. <https://analiseconomico.azc.uam.mx/index.php/rae/article/view/927>
- Rovenskaya, E. (2010). Optimal Economic Growth Under Stochastic Environmental Impact: Sensitivity Analysis. In: Crespo Cuaresma, J., Palokangas, T., Tarasyev, A. (eds) *Dynamic Systems, Economic Growth, and the Environment. Dynamic Modeling and Econometrics in Economics and Finance*, vol 12. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02132-9_5
- Sekholohla-Dlamini, L., & Tekere, M. (2020). Microbiology of municipal solid waste landfills: a review of microbial dynamics and ecological influences in waste bioprocessing. *Biodegradation*, 31, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10532-019-09890-x>
- Sikor, T., He, J., & Lestrelin, G. (2017). Property rights regimes and natural resources: a conceptual analysis revisited. *World Development*, 93, 337-349. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2016.12.032>
- Skare, M., Gavurova, B., & Kovac, V. (2023). Investigation of selected key indicators of circular economy for implementation processes in sectorial dimensions. *Journal of Innovation and Knowledge*, 8(4), 100421. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2023.100421>
- Smol, M., Duda, J., Czaplicka-Kotas, A., & Szoldrowska, D. (2020). Transformation towards circular economy (CE) in municipal waste management system: model solutions for Poland. *Sustainability*, 12(11), 4561. <https://doi.org/10.3390/su12114561>
- Sobhee, S. K. (2004). The environmental Kuznets curve (EKC): a logistic curve?. *Applied Economics Letters*, 11(7), 449-452. <https://doi.org/10.1080/1350485042000207216>
- Stegmann, P., Londo, M., & Junginger, M. (2020). The circular bioeconomy: its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resources, Conservation and Recycling: X*, 6, 100029. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100029>
- Taleb, M., & Al Farooque, O. (2021). Towards a circular economy for sustainable development: an application of full cost accounting to municipal waste recyclables. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124047. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124047>
- Tsang, Y. F., Kumar, V., Samadar, P., Yang, Y., Lee, J., Ok, Y. S., Song, H., Kim, K. H., Kwon, E. E., & Jeon, Y. J. (2019). Production of bioplastic through food waste valorization. *Environment International*, 127, 625-644. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.076>
- Van Engelenhoven, T., Kassahun, A., & Tekinerdogan, B. (2021). Circular business processes in the state-of-the-practice: a survey study. *Sustainability*, 13(23), 13307. <https://doi.org/10.3390/su132313307>
- Velenturf, A. P. M., & Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1437-1457. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018>
- Wang, R., Cao, Q., Zhao, Q., & Li, Y. (2018). Bioindustry in China: an overview and perspective. *New Biotechnology*, 40, 46-51. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2017.08.002>
- Watanabe, C., Naveed, N., & Neittaanmäki, P. (2019). Digitalized bioeconomy: planned obsolescence-driven circular economy enabled by Co-Evolutionary coupling. *Technology in Society*, 56, 8-30. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2018.09.002>

- Yong, R. (2007). The circular economy in China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 9(2), 121-129. <https://doi.org/10.1007/s10163-007-0183-z>
- Yun, B. Y., Cho, H. M., Kim, Y. U., Lee, S. C., Berardi, U., & Kim, S. (2020). Circular reutilization of coffee waste for sound-absorbing panels: a perspective on material recycling. *Environmental Research*, 184, 109281. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109281>
- Zhou, F., Lim, M. K., He, Y., Lin, Y., & Chen, S. (2019). End-of-life vehicle (ELV) recycling management: improving performance using an ISM approach. *Journal of Cleaner Production*, 228, 231-243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.182>
- Zhu, J., Fan, C., Shi, H., & Shi, L. (2019). Efforts for a circular economy in China: a comprehensive review of policies. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 110-118. <https://doi.org/10.1111/jiec.12754>