

---

# USOS DE MATERIALES Y ENERGÍA EN UNA TIERRA FINITA

*Uses of Materials and Energy in a Finite Earth*  
*Usos de Materiais e Energia em uma Terra Finita*

---

Carles Riba-Romeva<sup>1</sup> , Genís Riba-Sanmartí<sup>1</sup>  & Manuel Ayala-Chauvin<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Centro de Diseño de Equipos Industriales (CDEI), Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona-España. Correo: [carles.riba@upc.edu](mailto:carles.riba@upc.edu), [genis.riba@upc.edu](mailto:genis.riba@upc.edu)

<sup>2</sup> Centro de Investigación de Ciencias Humanas y de la Educación - CICHE, Universidad Tecnológica Indoamérica. Ambato-Ecuador. Correo: [mayala@uti.edu.ec](mailto:mayala@uti.edu.ec)

Fecha de recepción: 30 de julio de 2024.

Fecha de aceptación: 18 de octubre de 2024.

## RESUMEN

**INTRODUCCIÓN.** En este artículo se examina la relación entre los recursos materiales y la transición energética necesaria para mitigar el cambio climático. La Tierra es un sistema abierto en cuanto a la energía, pero cerrado en cuanto a materiales, lo que implica que su gestión sostenible es crucial. Se estima que del orden del 50% del sistema energético humano y del 70% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) están asociadas con la gestión de materiales, lo que subraya la necesidad de un nuevo tratamiento de la gestión de los materiales que limite el crecimiento continuo de la extracción de recursos a la vez que fomente una economía circular. El artículo concluye con una reflexión sobre las actitudes y las acciones necesarias para la transición post-fósil y la importancia de la educación en este proceso.

**OBJETIVO.** Analizar el impacto de los recursos materiales en la transición energética y proponer medidas para una gestión más sostenible. **MÉTODO.** Investigación teórica basada en el análisis de informes y datos sobre el uso de recursos materiales y energéticos. **RESULTADOS.** Se evidenció que la gestión de materiales es una de los principales consumidores de energía y constituye una de las principales fuentes de emisiones de GEI, y que una moderación en su consumo y la orientación hacia la economía circular pueden contribuir significativamente a reducirlas. **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.** Para avanzar hacia una civilización post-fósil se requiere, además de una concienciación general y una modificación de las actitudes, un cambio en la estructura del sistema energético, nuevas formas de financiación y una nueva regulación gestión de recursos adaptadas a las características de las energías renovables.

**Palabras claves:** materiales, energía, transición energética, economía circular, cambio climático.



## ABSTRACT

**INTRODUCTION.** This article examines the relationship between material resources and the energy transition needed to mitigate climate change. The Earth is an open system in terms of energy, but closed in terms of materials, which implies that its sustainable management is crucial. It is estimated that around 50% of the human energy system and 70% of greenhouse gas (GHG) emissions are associated with materials management, which underlines the need for a new approach to materials management that limits the continued growth of resource extraction while promoting a circular economy. The article concludes with a reflection on the attitudes and actions needed for the post-fossil transition and the importance of education in this process. **OBJECTIVE.** To analyse the impact of material resources on the energy transition and to propose measures for a more sustainable management. **METHOD.** Theoretical research based on the analysis of reports and data on the use of material and energy resources. **RESULTS.** It was found that materials management is one of the main consumers of energy and constitutes one of the main sources of GHG emissions, and that moderation in its consumption and orientation towards the circular economy can significantly contribute to reducing them. **DISCUSSION AND CONCLUSIONS.** In order to advance towards a post-fossil civilization, in addition to general awareness and a change in attitudes, a change in the structure of the energy system, new forms of financing and new resource management regulations adapted to the characteristics of renewable energies are required.

**Keywords:** materials, energy, energy transition, circular economy, climate change.

## RESUMO

**INTRODUÇÃO.** Este artigo examina a relação entre os recursos materiais e a transição energética necessária para mitigar as alterações climáticas. A Terra é um sistema aberto em termos de energia, mas fechado em termos de materiais, o que implica que a sua gestão sustentável é crucial. Estima-se que cerca de 50% do sistema energético humano e 70% das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) estão associadas à gestão de materiais, sublinhando a necessidade de uma nova abordagem à gestão de materiais que limite o crescimento contínuo da extração de recursos e, ao mesmo tempo, promova uma nova abordagem. economia circular. O artigo conclui com uma reflexão sobre as atitudes e ações necessárias para a transição post-fóssil e a importância da educação neste processo. **MIRAR.** Analisar o impacto dos recursos materiais na transição energética e propor medidas para uma gestão mais sustentável. **MÉTODO.** Pesquisa teórica baseada na análise de relatórios e dados de utilização de recursos materiais e energéticos. **RESULTADOS.** Ficou evidente que a gestão de materiais é um dos principais consumidores de energia e constitui uma das principais fontes de emissões de GEE, e que a moderação no seu consumo e a orientação para a economia circular podem contribuir significativamente para a sua redução. **DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.** Para avançar para uma civilização post-fóssil, além de uma consciência geral e de uma modificação de atitudes, é necessária uma mudança na estrutura do sistema energético, novas formas de financiamento e uma nova regulamentação de gestão de recursos adaptada às características das energias renováveis. .

**Palavras-chave:** materiais, energia, transição energética, economia circular, alterações climáticas.



## INTRODUCCIÓN

El mundo se enfrenta a desafíos sin precedentes en términos de sostenibilidad, especialmente relacionados con la gestión de los recursos energéticos y materiales. Mientras que la Tierra es un sistema abierto en términos de energía, recibiendo constantemente la radiación solar y emitiendo una energía equivalente, el planeta es un sistema cerrado en lo que respecta a los materiales.

La gestión de materiales, desde su extracción hasta su disposición final, está estrechamente vinculada con los usos energéticos y de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) de todo el sistema técnico humano. A medida que los recursos fósiles vayan disminuyendo, será imprescindible adoptar actitudes de mayor ahorro de los materiales, así como adoptar principios de economía circular que eviten en lo posible la extracción, minimicen el desperdicio y favorezca la reutilización.

La transición hacia un sistema energético basado en fuentes renovables no puede lograrse sin una nueva relación de los humanos con los materiales, ya que la gestión de éstos representa una gran parte del consumo de energía y de las emisiones de los gases de efecto invernadero a escala planetaria.

La nueva gestión de los materiales que debe adoptarse se enfrenta a varios tipos de desafíos: a) En primer lugar, la obtención de los materiales de producción masiva, como el acero, el cemento, los plásticos o los fertilizantes, requiere grandes cantidades de energía; si ésta ha sido generada con fósiles, causan gran cantidad de GEI; b) En segundo lugar, hay materiales cuyos procesos se basan en combustibles fósiles, como es el caso de la reducción de los óxidos de hierro con carbón en los altos hornos o los fertilizantes sintéticos obtenidos por reformado del gas natural; c) En otros materiales, es el propio proceso el que genera emisiones de GEI (independientemente de la energía usada), como es el caso de la descomposición de la piedra calcárea en la fabricación del cemento; d) Y, recientemente, las nuevas tecnologías de la digitalización y, también, de las tecnologías para la implantación de las energías renovables, hacen uso de materiales que debido a su rareza o a su baja concentración en las menas, devienen críticos a la vez que originan conflictos geoestratégicos por su desigual distribución en los distintos territorios [1].

El uso sostenible de los materiales y la energía en la Tierra requiere un enfoque multidisciplinar. Si bien las fuentes de energía renovables son cruciales para reducir las emisiones de carbono, su implementación depende de materias primas finitas [2]. Por ejemplo, la energía solar es abundante, pero algunos de los elementos necesarios para construir los captadores fotovoltaica son limitados [3]. Las estrategias de eficiencia de los materiales, incluido el reciclaje y la sustitución por alternativas más abundantes en la Tierra, son esenciales para abordar la escasez potencial de elementos críticos [4] [5]. El concepto de "servicios materiales" enfatiza la optimización del bienestar social al tiempo que se minimiza el impacto ambiental [6]. Se necesitan herramientas de gobernanza y monitoreo efectivas para la gestión sostenible de los recursos a escala local y global [7]. A medida que el uso de los recursos a nivel mundial continúa creciendo, es cada vez más urgente abordar las limitaciones ambientales [8]. Los avances en la ciencia de los materiales contribuyen al progreso hacia un futuro sostenible basado en energía limpia y una mejor gestión energética [9].

Una economía post-carbono sostenible requiere una gestión cuidadosa de los recursos de electricidad y biomasa, y algunos sectores necesitan una reestructuración



significativa [10]. El aumento de la población urbana y la demanda de energía y materiales están provocando alteraciones metabólicas que conducen a conflictos sociales por la apropiación de los recursos [11]. Los minerales críticos desempeñan un papel crucial en la transición a las energías limpias, lo que requiere planificación estratégica e innovación [12]. La producción de bioenergía sostenible y la gestión del paisaje son esenciales para satisfacer las demandas mundiales de alimentos, piensos, fibras y energía sin comprometer los recursos de suelo, agua y aire [13]. La coproducción de conocimientos es vital para diagnosticar y abordar las crisis socioeconómicas y ecológicas [14].

Este artículo analiza el impacto de los materiales en la transición energética y propone nuevas actitudes para gestionar los recursos de manera más sostenible.

## MÉTODO

A continuación, se analizan varios de los retos que el fin de la civilización de los combustibles fósiles pone ante el uso de los materiales. Para ello, los autores se han basado en varias hipótesis y en la interrelación de datos de distintas fuentes que se citan en los siguientes apartados.

### 1) Consumo creciente de materiales

La Fundación Circle Economy, creada el 2011 y con sede en Ámsterdam, analiza los usos de los materiales en la economía humana y su evolución a escala planetaria. La principal preocupación de esta fundación se centra en el estudio de la circularidad de los materiales en base a establecer una metodología para su contabilidad [15].

Desde 2018, Circle Economy elabora y publica unos Informes anuales sobre la Brecha de Circularidad (The Circularity-Gap Report, siendo el último de 2024 [16]) para el mundo que monitorean de forma metódica la circularidad en el contexto global del uso de los materiales. Más recientemente Circle Economy ha iniciado los estudios de la brecha de circularidad para países y ciudades.

Los Informes de la Brecha de Circularidad se estructuran como un verdadero balance de los materiales. Los materiales que entran en la economía se agrupan en cuatro grandes bloques: *biomasa* (alimentos, madera, leña, fibras); *minerales* (en su gran mayoría destinados a la construcción); *minas de metales*; y *combustibles fósiles*.

Es ilustrativo analizar la evolución de los usos de estos cuatro grandes grupos de materiales a lo largo de los últimos 120 años (1900-2020) y el cambio en sus proporciones. Para ello, la tabla 1 presenta la información sobre la evolución de los usos de materiales proporcionados por las publicaciones de Circle Economy, cuyos datos se han cruzado con estimaciones históricas de la población de [17] y de la energía [18].

En los últimos 120 años (1900-2020) la población mundial ha crecido de 1.650 a 7.750 millones de habitantes (4,7 veces). En estos mismos años, los usos energéticos han aumentado de 11.900 a 149.000 TWh/año (miles de millones de kWh), o sea 12,6 veces mientras que el uso de materiales ha sido el que ha experimentado un aumento superior, de 7.000 a 99.900 Mt/año (millones de toneladas), o sea 14,3 veces.

|      | Materiales |          | Población |          | Energía |          |
|------|------------|----------|-----------|----------|---------|----------|
|      | Mt/año     | 1900=100 | Mhab      | 1900=100 | TWh/año | 1900=100 |
| 1900 | 7.000      | 100      | 1.645     | 100      | 11.900  | 100      |
| 1970 | 28.000     | 400      | 3.670     | 223      | 61.700  | 518      |
| 2000 | 54.900     | 784      | 6.098     | 371      | 108.000 | 908      |
| 2020 | 99.900     | 1.428    | 7.753     | 471      | 149.900 | 1.259    |

## 2) Tendencia a una circularidad decreciente

Pero no tan solo la humanidad ha evolucionado hacia un gran aumento en el uso de materiales tanto en términos globales como en términos per cápita, sino que además se ha producido un desplazamiento desde un uso mayoritario de materiales biológicos hacia materiales extraídos del subsuelo, como pone de relieve la tabla 2.

|      | Total           |          | Biológicos      |          |        | Geológicos      |          |
|------|-----------------|----------|-----------------|----------|--------|-----------------|----------|
| año  | Kg/<br>/hab/año | 1900=100 | Kg/<br>/hab/año | 1900=100 | %Total | Kg/<br>/hab/año | 1900=100 |
| 1900 | 4.190           | 100      | 2.285           | 100      | 54,5%  | 1.905           | 100      |
| 1970 | 7.580           | 181      | 3.364           | 147      | 44,4%  | 4.214           | 221      |
| 2000 | 8.895           | 212      | 3.942           | 172      | 44,3%  | 4.953           | 260      |
| 2020 | 12.670          | 302      | 3.618           | 158      | 28,6%  | 9.053           | 475      |

Los valores de la tabla muestran un gran crecimiento de uso de materiales per cápita (3 veces entre 1900 i 2020), crecimiento especialmente intenso en los últimos años impulsado por la construcción y el crecimiento urbano.

Como se puede observar, este crecimiento es mucho menor en los materiales de base biológica (1,6 veces con cierta tendencia a la baja en los últimos años) y es mucho más importante en los materiales de extracción geológica (4,8 veces). Dentro de este grupo, los minerales (relacionados en gran medida con la construcción de edificios e infraestructuras) han crecido 7,4 veces, los combustibles fósiles 5,3 veces (con tendencia a un techo) y las minas de metales 1,8 veces.

Estos cambios inciden en la tasa de circularidad, ya que la reciclabilidad de los materiales de extracción geológica es mucho menor que los materiales de base biológica. En un artículo reciente [19] se llama la atención sobre el hecho de que el elementoma humano (o sea, el número y cantidad de elementos que usados por los humanos) diverge cada vez más del elementoma biológico formado por unos 10 elementos. Desde 1900, cuando el 80 % de los materiales provenía de la biomasa (alimentos, leña, madera), este porcentaje ha bajado el 32% en 2005 y nos dirigimos a una sociedad donde el 80% de los elementos procederá de fuentes no biológicas.

### 3) Materiales, energía y emisiones

Existe una estrecha relación entre la gestión de los materiales en todo su ciclo de vida (extracción, obtención, transformación, uso y fin de vida) con los consumos de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. En los Informes de la Brecha de Circularidad se afirma repetidamente que la gestión de los materiales causa el 70% de las emisiones. En base a los datos de los balances energéticos de IEA [20] i de las emisiones consignadas por el IPCC [21], los autores corroboran esta afirmación.

Para ello, asocian a la gestión de materiales las actividades del sector primario, del sector industrial, de los usos no energéticos de los fósiles, del 15% del transporte para la extracción y transformación de materiales: en 2019, absorbían 76.000 TWh/año (el 45,1% del sistema energético humano) y, junto con las emisiones de proceso del cemento y otros materiales, totalizaban unas emisiones de 20,1 GtCO<sub>2eq</sub>/año (el 53,0% de las emisiones por combustibles fósiles y procesos industriales, 37,9 GtCO<sub>2eq</sub>/año; al añadir las emisiones de las actividades AFOLU relacionadas con la gestión de los materiales biológicos (21,7 GtCO<sub>2eq</sub>/año), totalizaban 41,8 GtCO<sub>2eq</sub>/año, o sea, el 70,1% de las emisiones totales de este año (59,6 GtCO<sub>2eq</sub>, incluyendo AFOLU). La Tabla 3 resume los datos anteriores.

| Energía               |         |             |                   | Emisiones             |                        |             |                   |
|-----------------------|---------|-------------|-------------------|-----------------------|------------------------|-------------|-------------------|
|                       | TWh/a   | % total     | % GM <sup>1</sup> |                       | GtCO <sub>2eq</sub> /a | % total     | % GM <sup>1</sup> |
| Total                 | 168.500 | 100,0       |                   | Total (sin AFOLU)     | 37,9                   | 100,0       |                   |
| Gestión de servicios  | 92.500  | 54,9        |                   | Gestión de servicios  | 17,8                   | 47,0        |                   |
| Gestión de materiales | 76.000  | <b>45,1</b> | 100,0             | Gestión de materiales | 20,1                   | <b>53,0</b> | 100,0             |
| Obtención             | 51.700  | 30,7        | <b>68,0</b>       | Obtención             | 12,6                   | 33,2        | <b>62,8</b>       |
| Transformación        | 25.000  | 14,4        | 32,0              | Transformación        | 7,6                    | 19,8        | 37,2              |

<sup>1</sup> AFOLU, Emisiones agrícolas (y ganaderas), silvicultura, y otros usos del suelo; <sup>1</sup> GM = gestión de materiales. Fuentes: Energía [IEA-2024]; Emisiones, [IPCC-ARS-2022]; Energía y emisiones en la obtención de los principales materiales [Riba-2024]. Elaboración propia.

Aún hay otro aspecto a destacar: entre la energía y las emisiones de GEI de la gestión de los materiales, la mayor parte corresponden a la obtención de los materiales básicos (acero, cemento, grana de plástico, etc.) y solo una pequeña parte a su transformación en productos. Riba expone en [22] que la extracción y obtención de los 20 materiales más importantes a escala mundial (entre ellos acero, cemento, plásticos, aluminio, fertilizantes) absorben el 68,0% de la energía y emiten el 62,8% de los GEI de la gestión de materiales.

### 4) Los materiales críticos

El apartado anterior centraba la atención en los materiales más usados (acero, cemento, plásticos, aluminio, fertilizantes, combustibles fósiles, alimentos etc.) y sus implicaciones en costes energéticos y emisiones de GEI.

Sin embargo, las sociedades ricas y tecnológicamente más avanzadas, centran la atención en los materiales necesarios para la cuarta revolución industrial: entre ellos, el cobre, el cobalto, el litio, el níquel o el platino y donde destacan las tierras raras (17

elementos). Sus aplicaciones son la base de una sociedad de alta tecnología (teléfonos móviles, pantallas y leds, robótica, tecnologías aeroespaciales y, lamentablemente, también militares) a la vez que son para la transición energética (paneles fotovoltaicos, aerogeneradores, almacenes de energía, vehículos eléctricos).

No todos estos materiales son escasos o raros (por ejemplo, las tierras raras); sin embargo, suele haber pocas minas, sus concentraciones en las menas son bajas y los procesos de obtención son complejos y energéticamente costosos. La consideración de materiales críticos depende del país o región en función de los recursos disponibles y de los objetivos económicos y estratégicos.

### 5) Los límites de la circularidad

Interpretando el valor económico de las minas, los profesores Antonio Valero i Alicia Valero, establecieron el modelo de thanatia [23]. Éste consiste en suponer una corteza de la Tierra con una única roca común de la composición mineralógica media de los minerales que la forman, en concentraciones muy pequeñas, siendo todas las aguas saladas i una atmósfera que contenga los gases de la quema de todos los combustibles.

Con energía suficiente, a partir de thanatia se podrían reconstruir todas las minas del mundo (o, las aguas dulces, o los combustibles) a partir de los materiales dispersos. El coste energético de reposición (o evitado) es la exergía (o energía útil) que habría que invertir para concentrar un mineral desde la roca común hasta la mina. Por ejemplo, la concentración del cobre a thanatia sería de 0,0000664% mientras que en las minas de calcopirita de donde se extrae, es de 0,5% (casi 10.000 veces superior).

En general se explotan las minas más ricas y accesibles. Pero, a medida que las concentraciones van bajando, los costes energéticos van subiendo. El modelo de thanatia muestra que la apuesta tecnológica actual es incompatible con una economía circular estricta. Además de las concentraciones decrecientes de las fuentes, incluso en los mejores procesos de reciclado existe una cierta dispersión de materiales en los medios. Es por ello que los investigadores Valero en lugar del concepto de economía circular proponen el concepto de economía espiral descendente.

La dificultad de la circularidad estricta de los materiales viene corroborada en el Informe de la brecha de Circularidad de 2023 [24], de Circular Economy, donde se afirma que la economía global depende cada vez más de materiales de origen virgen. En seis años, la circularidad global ha bajado de 9,1% en el Informe del 2018 a 7,2% en el informe de 2023. Se puede afirmar que la circularidad disminuye a medida que aumenta la tasa de extracción, a lo que se une el hecho de que cada vez más materiales entran en las existencias (o stocks).

## RESULTADOS

Los principales resultados del presente trabajo son:

En 2021, la humanidad utilizó por primera vez más de 100 gigatoneladas de materiales, lo que representa una media de 12.750 kg por habitante al año.

De este total, el 92,7% de los materiales proviene de la extracción, mientras que solo el 7,2% son materiales reciclados. La tasa de circularidad ha bajado del 9,1% en 2018 a 7,2% en 2023.



La mayor parte de los materiales extraídos son minerales no metálicos, menas de metales y combustibles fósiles mientras que la mayor parte de los materiales reciclados corresponden a materias de origen biológico.

La gestión global de los materiales (obtención, transformación, usos y fin de vida) absorben el 45% de la energía del sistema técnico humano y emiten el 53% de las emisiones de GEI (con las actividades AFOLU, las emisiones se elevan al 70%).

De la energía y las emisiones involucradas en la gestión de los materiales, aproximadamente 2/3 corresponde a la extracción y obtención de los materiales básicos (acero, cemento, plásticos, asfalto, fertilizantes, cereales). El resto corresponde a su transformación en productos y construcciones y a su fin de vida.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Estos resultados subrayan la conveniencia de abandonar el crecimiento continuo asociado a un aumento constante de recursos materiales, especialmente aquellos que requieren elementos críticos, y la necesidad de transformar la economía lineal actual en una economía lo más cercano posible a una economía circular.

Para ello, deben producirse transformaciones en los siguientes ámbitos: a) Promover la concienciación y cambio de actitudes y de valores; b) Impulsión y experimentación en acciones sostenibles e investigación sobre nuevas soluciones innovadoras; y c) Nueva regulación y legislación acorde con el paradigma renovable.

**a) Concienciación y cambio de actitudes.** Hay que impulsar la toma de conciencia del reto que representa la transición a las fuentes energéticas renovables y modificar las actitudes para adaptarnos a esta nueva situación. En concreto, en lo que se refiere a la gestión de los materiales deberían adoptarse los siguientes principios: *Reducir* en lo posible el uso de materiales; *Mantener* los bienes en buen estado de funcionamiento; *Alargar la vida* de los bienes; *Regenerar los materiales* o bienes en segundos usos o bien reciclándolos.

**b) Impulsar acciones, experimentar e investigar.** Habrá que proceder en base a experimentar con acciones transformadoras hacia el nuevo sistema renovable en las que las aplicaciones y los usos de los materiales van a ser una parte fundamental. Entre ellas: En lo posible, **retornar al uso de materiales de base biológica** puesto que tienen una capacidad de circularidad mucho mejor; evitar la **dispersión de materiales en los medios**; **investigar en soluciones o procesos alternativos** en aquellos materiales (como el cemento o el acero) cuya obtención actual genera emisiones de proceso.

**c) Nueva estructura y nueva regulación del sistema energético.** La estructura del sistema energético, los sistemas de financiación y las regulaciones y leyes que rigen las sociedades actuales responden a la existencia y las características de los combustibles fósiles. En efecto: son vectores energéticos extraídos del subsuelo en pocos lugares del mundo que requieren grandes compañías para su extracción y comercialización, tienen una elevada densidad energética, lo que facilita las grandes potencias, además son almacenables y no requieren de superficies de captación. En cambio, las fuentes de energía renovable son distribuidas y escalables, accesibles en mayor o menor grado en todas las partes del mundo, lo que **facilitan el autoconsumo** inexistente en el sistema fósil, tienen una menor densidad energética, lo que lleva a

**optimizar los rendimientos** (especialmente en la obtención y uso de los materiales) y a **moderar las potencias**, deben captarse en **grandes superficies de territorio**, y la mayor parte de ellas (especialmente la fotovoltaica y la eólica) requieren **sistemas de almacenaje masivo de electricidad**, hoy día aun no desarrollados. Todo ello afectará tanto a las formas de obtención de la energía como en sus usos en lo que constituirá un verdadero cambio de civilización.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

La investigación no fue financiada.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran la no presencia de conflicto de intereses.

## APORTE DEL ARTÍCULO EN LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Este artículo contribuye a la línea de investigación sobre Economía Circular al proporcionar un análisis detallado de la gestión de materiales y su relación con las emisiones de gases de efecto invernadero, un área clave en el debate sobre la sostenibilidad.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE CADA AUTOR

Los autores contribuyeron de manera igualitaria.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Politécnica de Cataluña y a la Universidad Tecnológica Indoamérica.

## REFERENCIAS

- [1] J. Felipe-Andreu, A. Valero, and A. Valero, "Territorial Inequalities, Ecological and Material Footprints of the Energy Transition: Case Study of the Cantabrian-Mediterranean Bioregion," *Land*, vol. 11, no. 11. 2022. doi: 10.3390/land11111891.
- [2] F. Schmidt, A. Schäffer, and M. Lenz, "Renewable energy from finite resources: Example of emerging photovoltaics," *Chimia (Aarau)*, vol. 73, no. 11, pp. 874–879, 2019, doi: 10.2533/chimia.2019.874.
- [3] B. Sørensen, "Energy and Resources," *Renew. Energy*, 2018, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:239483810>
- [4] C. J. Rhodes, "Endangered elements, critical raw materials and conflict minerals.," *Sci. Prog.*, vol. 102, no. 4, pp. 304–350, Dec. 2019, doi: 10.1177/0036850419884873.
- [5] E. Worrell, J. Allwood, and T. Gutowski, "The Role of Material Efficiency in Environmental Stewardship," *Annu. Rev. Environ. Resour.*, vol. 41, pp. 575–598, 2016, doi: 10.1146/annurev-environ-110615-085737.
- [6] L. G. Carmona, K. Whiting, A. Carrasco, T. Sousa, and T. Domingos, "Material Services with Both Eyes Wide Open," *Sustainability*, vol. 9, no. 9. 2017. doi: 10.3390/su9091508.



- [7] S. Bringezu *et al.*, “Multi-Scale Governance of Sustainable Natural Resource Use—Challenges and Opportunities for Monitoring and Institutional Development at the National and Global Level,” *Sustainability*, vol. 8, no. 8. 2016. doi: 10.3390/su8080778.
- [8] E. A. Olivetti and J. M. Cullen, “Toward a sustainable materials system,” *Science (80-.)*, vol. 360, no. 6396, pp. 1396–1398, Jun. 2018, doi: 10.1126/science.aat6821.
- [9] S. Chu, Y. Cui, and N. Liu, “The path towards sustainable energy,” *Nat. Mater.*, vol. 16, no. 1, pp. 16–22, 2017, doi: 10.1038/nmat4834.
- [10] A. García-Olivares, “Substitutability of Electricity and Renewable Materials for Fossil Fuels in a Post-Carbon Economy,” *Energies*, vol. 8, no. 12. pp. 13308–13343, 2015. doi: 10.3390/en81212371.
- [11] C. W. Porto-Gonçalves, “Lucha por la Tierra: Ruptura metabólica y reapropiación social de la naturaleza,” *P.*, vol. 15, no. 45, pp. 291–316, 2016, doi: 10.4067/s0718-65682016000300015.
- [12] A. Valero, A. Valero, and G. Calvo, “Summary and critical review of the International Energy Agency’s special report: The role of critical minerals in clean energy transitions,” *Rev. Metal.*, vol. 57, no. 2, 2021, doi: 10.3989/REVMETALM.197.
- [13] K. D. L and M. D. J. Jr, “Landscape Management for Sustainable Supplies of Bioenergy Feedstock and Enhanced Soil Quality Gestión del paisaje para la producción sustentable de materia prima para bioenergía y mejora de la calidad del suelo,” *Agrociencia*, vol. 17, no. 2, pp. 121–130, 2013.
- [14] G. C. Delgado Ramos, “Coproducción de conocimiento, fractura metabólica y transiciones hacia territorialidades socio-ecológicas justas y resilientes Co-production of knowledge, metabolic rift and socio-ecological transitions towards fair and resilient territorialities,” *Polis. Rev. Latinoam.*, vol. 14, no. 41, pp. 85–96, 2015, [Online]. Available: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/polis/v14n41/art06.pdf>
- [15] Circle Economy, “The Circularity Gap Report 2023. Methods (v 1.0)”. November 19, 2022, Amsterdam: Circle Economy. <https://www.circularity-gap.world/2023>
- [16] Circle Economy, “The Circularity Gap Report 2024. A circular economy to live within the safe limits of the planet”, July 2024, Amsterdam, Circle Economy Foundation. <https://www.circularity-gap.world/2024>
- [17] OWID, “Population by country, available from 10,000 BCE to 2023”. Our World in Data, Last updated July 15, 2024. <https://ourworldindata.org/grapher/population>
- [18] CDIAC, “Fossil-Fuel CO2 Emissions”. Carbon Dioxide Information Analysis Center. [https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/meth\\_reg.html](https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/meth_reg.html) (consulta 2023).
- [19] Peñuelas, J., Sardans, J., & Terradas. “Increasing divergence between human and biological elementomes”. *Trends in Ecology & Evolution* 37(11): p. 935-938, November, 2022.
- [20] IEA, “Energy balances”, Agencia Internacional de la Energía, París 2024. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>
- [21] IPCC, “Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change. Emissions Trends and Drives (Chapter 2)”. IPCC-AR6-2022, Working Group III (WGIII) Contribution to the Sixth Assessment Report (AR6) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

- [22] Riba-Romeva, C. “Energía, una inmersión rápida”, Tibidabo Ediciones, Barcelona, septiembre de 2024.
- [23] Valero, Antonio; Valero, Alicia; Almazán, Adrián, “Thanatia. Los límites minerales del planeta”. Editorial Icaria S.A., Barcelona, abril de 2021.
- [24] Circle Economy, “The Circularity-Gap Report 2023. A circular economy to live within the safe limits of the planet”, Circle Economy Foundation, Amsterdam, gener de 2023. <https://circularity-gap.world/2023>.

## NOTA BIOGRÁFICA



Carles Riba Romeva. **ORCID iD**  <http://orcid.org/0000-0002-7979-387X>  
Es Doctor Ingeniero Industrial (1976) por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Ha sido profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica desde 1971 hasta 2017. En 1999 crea i dirige CDEI-UPC (Centro de Diseño de Equipos Industriales) y el Máster EMEI (Ingeniería Mecánica y Equipos Industriales). Su investigación se ha centrado en metodologías de diseño de maquinaria y equipos industriales y, en los últimos años, en la transición energética. Autor en numerosos artículos en revistas y escritos en congresos y de unos 20 libros técnicos (3 de ellos sobre energía). Desde 2017 es profesor emérito de la UPC. Desde 2012 preside la asociación CMES (Colectivo para un nuevo modelo energético y social sostenible).



Genís Riba Sanmartí. **ORCID iD**  <http://orcid.org/0000-0002-9930-915X>  
Es Ingeniero Industrial intensificación en Técnicas Energéticas y doctorando por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Su línea de investigación principal (objeto de su doctorado) es sobre la obtención y usos globales de la energía en territorios subregionales y su relación de la transición energética. Actualmente es investigador del CDEI-UPC (Centro de Diseño de Equipos Industriales de la Universitat Politècnica de Catalunya), Barcelona (España).



Manuel Ignacio Ayala Chauvin. **ORCID iD**  <https://orcid.org/0000-0002-3911-377X>  
Es investigador de la Universidad Tecnológica Indoamérica. Doctor en Sostenibilidad por la Universidad Politécnica de Cataluña, Master en Ingeniería Mecánica y Equipamiento Industrial e Ingeniero Electromecánico. Su línea de investigación es la optimización de flujos energéticos, transición energética, energías renovables.



This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.