



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ECONOMÍA ♦ DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ECONOMÍA

**Límites del crecimiento
y termodinámica del proceso económico**

ENSAYO

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
Especialista en Economía Ambiental y Ecológica

PRESENTA:

Germán González Dávila

TUTOR:

Prof. Eduardo Vega López

Agradecimientos

Agradezco a mi tutor, Prof. Eduardo Vega López, por su acompañamiento en el desarrollo y revisión de este ensayo, así como por haberme permitido descubrir a Nicholas Georgescu-Roegen y la crítica de la termodinámica al proceso económico. También al profesor Enrique Provencio Durazo, cuyas observaciones al presente ensayo me permitieron profundizar algunos temas clave, particularmente sobre el flujo de materiales y sobre los escenarios a futuro. Asimismo, agradezco a la Maestra Karina Caballero y a todo el equipo de la Especialización de Posgrado en Economía Ambiental y Ecológica por haber creado y mantener este espacio educativo estratégico que permite descubrir cómo se aplica la ley de la entropía en el proceso económico.

Resumen

Este ensayo aborda (1) el debate sobre los límites del crecimiento económico en relación con las restricciones biofísicas que impone la biosfera y con el paradigma de la sostenibilidad, (2) los umbrales de procesos planetarios que caracterizan las condiciones del Holoceno y (3) la entropía del proceso económico —que la teoría económica neoclásica no toma en cuenta. Un capítulo se dedica a cada uno de estos tres temas.

En el primer capítulo se presenta una revisión del reporte original sobre los límites del crecimiento que el Club de Roma solicitó a principios de los años 1970 a un equipo de investigadores del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), publicado en 1972. Se reconoce la influencia de los resultados de este estudio en la realización de la primera Cumbre de las Naciones Unidas sobre medio ambiente y desarrollo humano (Estocolmo, 1972), así como en la instalación de las políticas públicas ambientales modernas y su derivación en el paradigma del desarrollo sostenible. Esta revisión se complementa con una descripción general de la biosfera, de la dinámica demográfica humana, del flujo de materiales a través del proceso económico y de la gran aceleración, para aterrizar en las definiciones de sostenibilidad débil y sostenibilidad fuerte.

El segundo capítulo presenta el enfoque de análisis sobre la transgresión de Umbrales Planetarios, desarrollado por el Centro de Resiliencia de Estocolmo que, desde su primera publicación en 2009, se posicionó como uno de los referentes más significativos relacionados con los límites del crecimiento. Esta descripción pasa lista a los nueve límites planetarios identificados, de los cuales siete de ellos ya han sido transgredidos.

El tercer capítulo contiene un análisis sobre la crítica que la economía ecológica ha hecho a la teoría económica neoclásica, en particular a sus modelos de flujo circular y de producción agregada, haciendo énfasis en la crítica realizada por Nicholas Georgescu-Roegen de acuerdo con la ley de la entropía y se presenta su modelo de flujos-fondos.

Palabras clave: límites del crecimiento, PIB, flujo de materiales, gran aceleración, límites planetarios, transgresión de umbrales planetarios, función de producción agregada, función de flujos-fondos, Nicholas Georgescu-Roegen, economía ecológica.

Abstract

This essay addresses the debate on the limits of economic growth in relation to the biophysical constraints imposed by the biosphere, the thresholds of planetary processes that characterise Holocene conditions, and the entropy of the economic process—which neoclassical economic theory does not take into account. One chapter is devoted to each of these three topics.

The first chapter presents a review of the original report on the limits to growth that the Club of Rome commissioned in the early 1970s from a team of Massachusetts Institute of Technology (MIT) researchers, published in 1972. It acknowledges the influence of the results of this study on the holding of the first United Nations Conference on the Human Environment and Development (Stockholm, 1972), as well as on the establishment of modern environmental public policies and their derivation into the paradigm of sustainable development. This review is complemented by a general description of the biosphere, human

demographic dynamics, the flow of materials through the economic process and the great acceleration, leading to the definitions of weak and strong sustainability.

The second chapter presents the analysis approach on the transgression of Planetary Boundaries, developed by the Stockholm Resilience Centre, which, since its first publication in 2009, has positioned itself as one of the most significant references related to the limits of growth. This description lists the nine planetary boundaries identified, seven of which have already been transgressed.

The third chapter contains an analysis of the criticism levelled by ecological economics at neoclassical economic theory, particularly its circular flow and aggregate production models, emphasising the criticism made by Nicholas Georgescu-Roegen based on the law of entropy and his flows-stocks model.

Keywords: limits to growth, GDP, material flows, great acceleration, planetary boundaries, transgression of planetary thresholds, aggregate production function, flows-stocks function, Nicholas Georgescu-Roegen, ecological economics.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	7
1. Límites del crecimiento y sostenibilidad.....	11
1.1 <i>Límites del crecimiento</i>.....	11
1.1.1 Biosfera.....	11
1.1.2 Población	15
1.1.3 El Reporte Meadows	16
1.2 <i>La Gran Aceleración</i>	20
1.2.1 Flujo global de materiales.....	22
1.2.2 Rebase ecológico planetario	25
1.2.3 Antropoceno.....	27
1.3 <i>Sostenibilidad y desarrollo sostenible</i>	28
1.3.1 Ecodesarrollo o desarrollo sostenible	29
1.3.2 Sostenibilidad débil y sostenibilidad fuerte.....	31
2. Umbrales planetarios	37
2.1 <i>Enfoque interdisciplinario sobre límites planetarios</i>	37
2.2 <i>Los siete límites planetarios transgredidos</i>.....	43
2.2.1 Integridad de la biosfera	44
2.2.2 Cambio climático (ciclo biogeoquímico del carbono)	46
2.2.3 Acidificación de los océanos (ciclo biogeoquímico del carbono)	47
2.2.4 Ciclos biogeoquímicos del nitrógeno y del fósforo.....	48
2.2.5 Ciclo del agua	49
2.2.6 Integridad de los suelos	50
2.2.7 Integridad ambiental (libre de contaminación).....	51

2.3 Umbrales planetarios no transgredidos.....	53
2.3.1 Aerosoles en la atmósfera	53
2.3.2 Capa de ozono	54
3. Termodinámica del proceso económico	57
 3.1 Termodinámica	57
3.1.1 Trabajo y energía	58
3.1.2 Tipos de sistemas	60
3.1.3 Energía interna y energía térmica	60
3.1.4 Fuentes de energía	62
3.1.5 Combustibles fósiles: un subsidio ecológico.....	62
3.1.6 Leyes de la termodinámica	63
 3.2 El proceso económico.....	68
3.2.1 Administrar la escasez	68
3.2.2 Teorías económicas.....	68
3.2.3 Microeconomía.....	70
3.2.4 Macroeconomía	71
3.2.5 El modelo de flujo circular	72
3.2.6 El modelo de producción agregada	74
 3.3 Entropía del proceso económico	75
3.3.1 Antecedentes.....	75
3.3.2 Nicholas Georgescu-Roegen	76
3.3.3 El modelo de flujos-fondos.....	78
3.3.4 Ecuación del modelo de flujos-fondos	80
3.3.5 Longevidad industrial de <i>Homo sapiens</i>	82
Conclusiones.....	85
Bibliografía.....	93

INTRODUCCIÓN

Si existen o no y qué tanto límites del crecimiento económico es, sin duda, un debate interdisciplinario central en relación con la posibilidad de un desarrollo sostenible a largo plazo. Debate que se instauró definitivamente en la escena internacional a partir de la presentación de los resultados, en 1971, sobre *Los límites del crecimiento*¹ (Donella Meadows *et al.*, 1972); estudio solicitado por el Club de Roma a investigadores del Massachusetts Institute of Technology (MIT)². Desde su publicación, en 1972, alrededor de 30 millones de copias en más de 30 idiomas han sido vendidas (Nørgård *et al.*, 2010)³ y, desde entonces, ha influido en muchas reformas ambientales.

Más recientemente, investigadores del *Stockholm Resilient Centre*⁴ (SRC) desarrollaron un enfoque de análisis sobre nueve procesos clave de la biosfera (Rockström *et al.*, 2009), que mantienen las condiciones propias del Holoceno⁵, condiciones que hicieron posible el florecimiento de la civilización humana durante los últimos 12 mil años. Cada uno de estos procesos presenta límites para mantener su funcionamiento en tales condiciones, pero la presión humana ha transgredido ya los umbrales de siete de ellos, poniendo en riesgo el espacio planetario seguro para poder continuar el desarrollo humano.

Por su parte, el Programa de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente (PNUMA; UNEP por sus siglas en inglés) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) han lanzado el desarrollo de conocimientos y difusión de información sobre el uso de recursos naturales que se incrementa exponencialmente con el crecimiento económico

¹ <https://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf>

² <https://www.mit.edu>

³ <https://web.archive.org/web/20140720093436/http://thesolutionsjournal.com/node/569>

⁴ <https://www.stockholmresilience.org>

⁵ Época geológica actual, periodo interglacial que inició hace alrededor de 11 mil 700 años con la retirada de la última glaciación. <https://stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2023-09Spanish.pdf>

(UNEP 2011⁶ y 2024⁷) (OCDE 2018⁸). Cosa de interés estratégico para disponer de una contabilidad complementaria al Producto Interno Bruto (PIB), en términos de flujo de materiales a través del proceso económico global.

Sin embargo, hasta ahora la dimensión termodinámica del proceso económico ha sido menospreciada por la teoría económica y las políticas económicas y ambientales. Dimensión física considerada principalmente por Nicholas Georgescu-Roegen (NGR) durante la década de 1960 y, en particular, a partir de la publicación de su obra maestra: *The Entropy Law and the Economic Process* (Georgescu-Roegen, 1971). NGR demostró que la teoría económica neoclásica ignora las leyes físicas fundamentales, particularmente el principio de entropía, al suponer que la economía es un sistema cerrado de dinámica reversible, independiente de los límites ecológicos y del carácter irreversible de la fenomenología del mundo real. El pensamiento de NGR ha dado lugar a un esfuerzo teórico por integrar la dimensión de la termodinámica en la teoría económica, propició el desarrollo de la economía ecológica e influenció las corrientes que plantean la necesidad del decrecimiento.

Así las cosas, el debate económico alrededor del decrecimiento opone dos visiones fundamentales de la finalidad de la economía que corresponden **dos escalas de tiempo** muy diferentes: visión de corto plazo, el crecimiento incansante del PIB se considera como indispensable motor del progreso; o, visión de largo plazo, la limitación voluntaria de la explotación de recursos naturales a fin de preservar las condiciones del espacio planetario seguro en el cual es posible una prosperidad sostenible. Actualmente el debate va más allá de la simple oposición entre crecimiento y decrecimiento —caso de la propuesta de «post-crecimiento» (Savini, 2024)— y se busca una vía intermediaria. En todo caso, el consenso emergente entre especialistas es que las políticas económicas debieran asegurar una **sostenibilidad fuerte**, es decir, **la no sustituibilidad del capital natural**.

⁶ <https://wedocs.unep.org/items/c337f278-f250-40a6-bcc0-57da308b2e0d>

⁷ <https://wedocs.unep.org/items/3ec5991f-1ab2-4d54-9000-c9d3cee81d16>

⁸ https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/02/global-material-resources-outlook-to-2060_g1g98d7d/9789264307452-en.pdf

Todo parece indicar que este debate continuará profundizándose en el presente siglo, abriendo espacios a una renovada crítica de la lógica capitalista (Saito, 2024) y, particularmente, de la lógica de la política económica dominante que asume que crecer indefinidamente no sólo es necesario sino, también, posible.

Con la intención de resultar una lectura útil para los interesados en el debate sobre los límites del crecimiento, los objetivos de este ensayo son:

- a) revisar el planteamiento original sobre los límites del crecimiento y su derivación en el paradigma del desarrollo sostenible, en el marco de la realidad ecológica;
- b) presentar el estado del arte del enfoque de transgresión de umbrales planetarios;
- c) realizar una exposición de la dimensión termodinámica del proceso económico, con particular atención a la crítica de la función de producción agregada de la teoría neoclásica y a la teoría de flujos-fondos propuesta por Georgescu-Roegen; y,
- d) contribuir al debate sobre los límites biofísicos del crecimiento considerando la no transgresión de umbrales planetarios y la entropía del proceso económico.

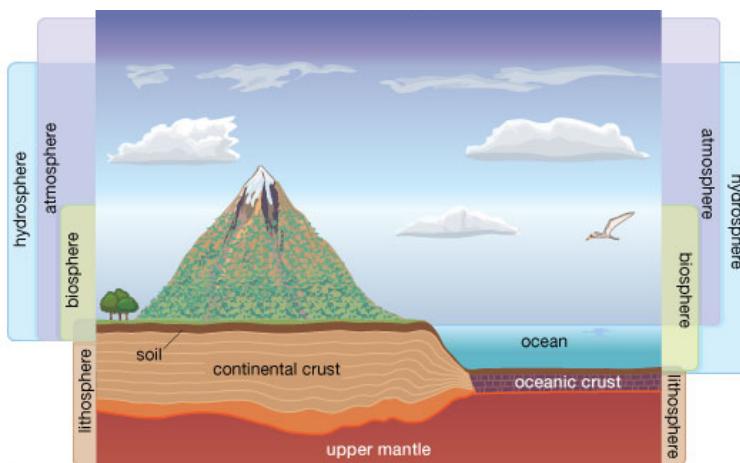
1. Límites del crecimiento y sostenibilidad

1.1 Límites del crecimiento

1.1.1 Biosfera

La biosfera es la delgada capa —alrededor de 20 km— de la Tierra que sustenta la vida, extendiéndose desde unos pocos kilómetros en la atmósfera, las tierras emergidas y hasta las fuentes hidrotermales de las profundidades oceánicas.

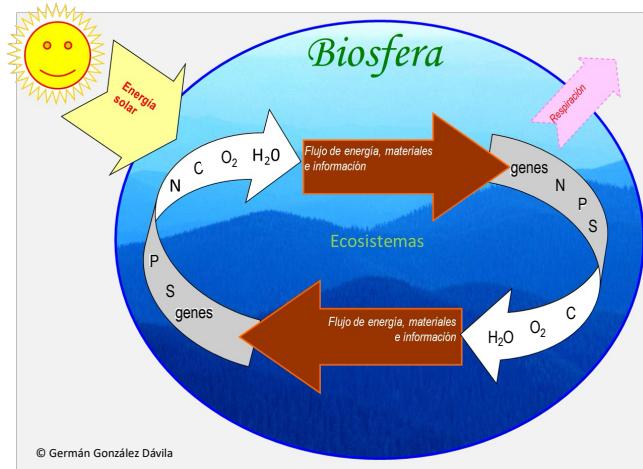
Figura 1. Biosfera, una de las capas del Sistema Tierra.



Fuente: <https://www.britannica.com/science/biosphere/The-importance-of-the-biosphere>

La biosfera está constituida por dos componentes: biótico y abiótico. La parte biótica son todos los seres vivos: productores, consumidores y descomponedores. La parte abiótica, o no viva, incluye energía, nutrientes, agua y gases, así como sustancias orgánicas e inorgánicas dispersas en el medio ambiente. Constituida por la totalidad de los ecosistemas de la Tierra, configura una compleja red de redes tróficas y de flujo de energía y materiales (Figura 2) a través de ciclos biogeoquímicos del carbono, del nitrógeno, del fósforo, del azufre, del agua, etc. (Hutchinson, G. *et al* 1970).

Figura 2. Con el suministro cotidiano de energía solar la biosfera se mantiene en funcionamiento.

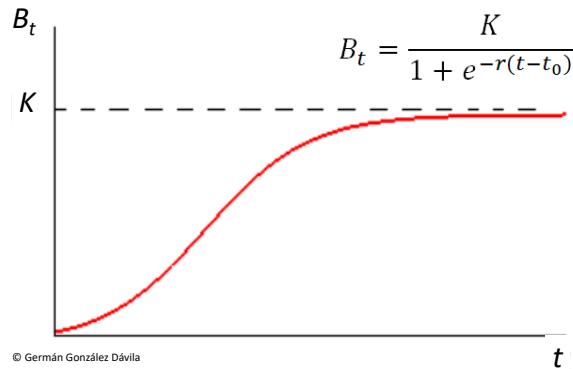


Fuente: elaboración propia.

Las poblaciones de todas las especies de todos los seres vivos forman parte de esta red de redes tróficas y de ciclos biogeoquímicos y dependen de ella para su supervivencia y reproducción. Igualmente la población, hoy global, de *Homo sapiens*. Por consiguiente, la humanidad con su sistema económico global es un subsistema de la biosfera, sujeto a las leyes físicas y biológicas que rigen el flujo de energía y materiales.

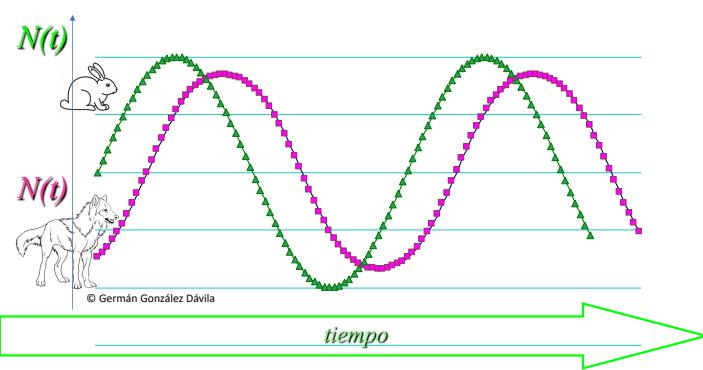
Una teorema fundamental de la ecología es la capacidad de carga (K) de los ecosistemas (Odum EP, 1971). Lo que significa que el tamaño (número de individuos o biomasa total) de cada población de una especie que habita en algún ecosistema determinado está limitada por los recursos disponibles para ella. Si el crecimiento de la población en el tiempo (t), considerando el número de individuos (N_t) o la biomasa (B_t), rebasa los recursos disponibles (K) sobreviene una reducción poblacional o, incluso, un colapso, dependiendo del grado de transgresión a los límites de carga. En general, esto se ilustra con una curva logística, que indica la tendencia central —exponencial al principio y asintótica hacia el final— (Figura 3) en el crecimiento de una población a partir de su arribo a un ecosistema habitable para ella, hasta alcanzar su máxima talla poblacional posible en él.

Figura 3. Curva logística que representa la tendencia central de la tasa de crecimiento (r) de una población en un ecosistema dado, durante un cierto tiempo (t), hasta alcanzar su máxima talla posible en biomasa (B_t), talla limitada por la capacidad de carga del ecosistema (K).



Fuente: elaboración propia.

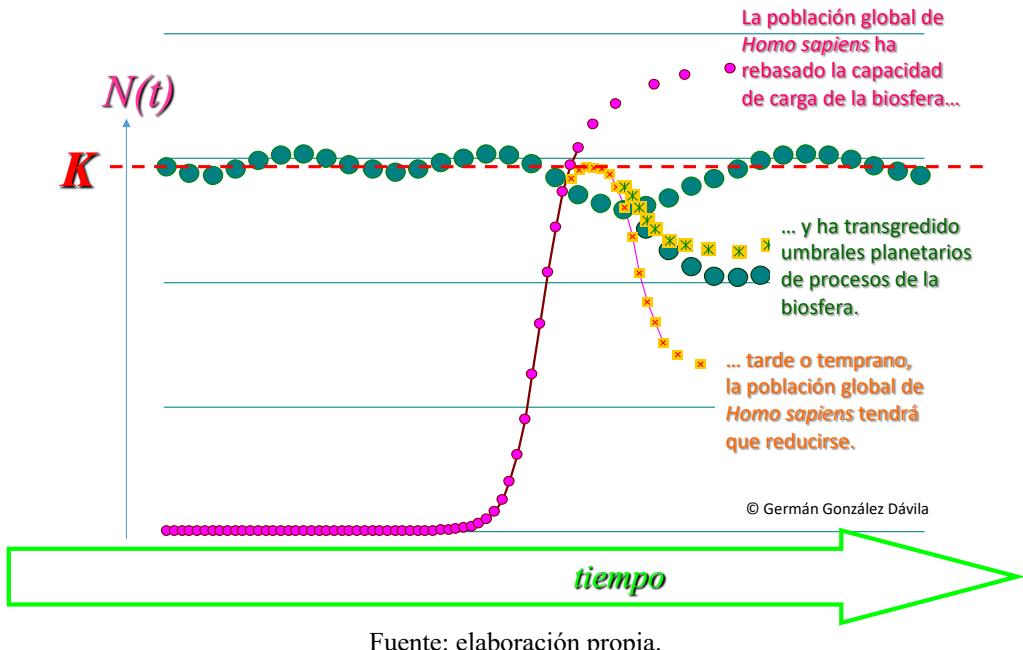
Figura 4. Curva que representa los altibajos, en número de individuos (N_t), de un sistema predador – presa.



Fuente: elaboración propia.

Otro teorema fundamental de la ecología se refiere al sistema predador-presa (Odum EP, 1971), que explica la dinámica regulatoria demográfica entre uno y otro a través del tiempo. Por ejemplo, si una especie de conejos coloniza exitosamente un nuevo territorio, su población crecerá siguiendo una tendencia central logística. Pero si detrás de ellos llega también una población de lobos, ésta crecerá igualmente en la medida que dispongan de suficientes conejos para alimentarse. Pero justo debido a la presión predadora de los lobos, en cierto momento t la población de conejos disminuirá, con lo que la de lobos también, en la medida que se reduce la población de conejos. Una vez disminuida la población de lobos, la de conejos puede volver a crecer, con lo que la de lobos, detrás de ellos, también vuelve a crecer... Y el ciclo se repite, indefinidamente (Figura 4).

Figura 5. Curva que representa la tendencia central de crecimiento de la población humana global durante el Holoceno y su rebase de la capacidad de carga de la biosfera (K), cuya capacidad de regeneración ha disminuido debido a la degradación de procesos clave, por los impactos adversos de las actividades humanas.



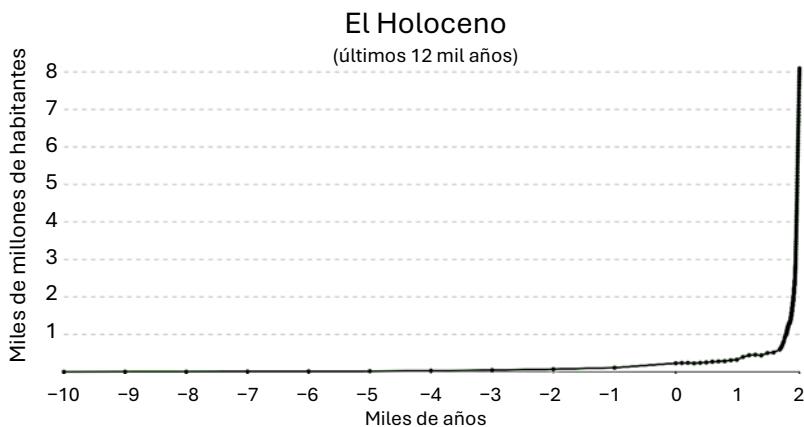
Fuente: elaboración propia.

En la medida que *Homo sapiens* no utiliza solamente los espacios y los recursos de algunos ecosistemas, sino de la biosfera en su conjunto, la capacidad de carga de la población humana global debe medirse a escala de la biosfera en su conjunto (Figura 5). En la Introducción se señaló que la presión humana ha transgredido ya algunos límites de procesos claves de la biosfera, poniendo en riesgo el espacio planetario seguro para la continuación del desarrollo humano; es decir, la población global de *Homo sapiens* ha rebasado la capacidad de carga de la biosfera para continuar sosteniendo sus modos de producción y consumo (explotación de recursos naturales), por lo que, de manera equivalente al comportamiento de un sistema predador-presa, las previsiones de la teoría ecológica indican que la población humana global tendrá que reducirse tarde o temprano porque, concomitante a la transición demográfica que por razones socio-culturales las proyecciones de las Naciones Unidas señalan (Figura 7), la población global del primate *Homo sapiens* ha rebasado la capacidad de carga de la biosfera y reducido su biocapacidad de regeneración.

1.1.2 Población

Luego de muchos de miles de años de ser una población de sólo algunos miles, o cientos de miles de individuos sobre la Tierra, el fin de la última glaciación hace 12 mil años y la instalación del Holoceno propiciaron la revolución agrícola, con lo que la población de *Homo sapiens* alcanzó los primeros millones de habitantes. El primer centenar de millones se logró nueve mil años después; y los 500 millones hacia el año 1500 de nuestro calendario. El primer millar de millones de habitantes en el planeta se alcanzó hasta la década de 1820, ya iniciada la revolución industrial.

Figura 6. Crecimiento demográfico de *Homo sapiens* durante el Holoceno.



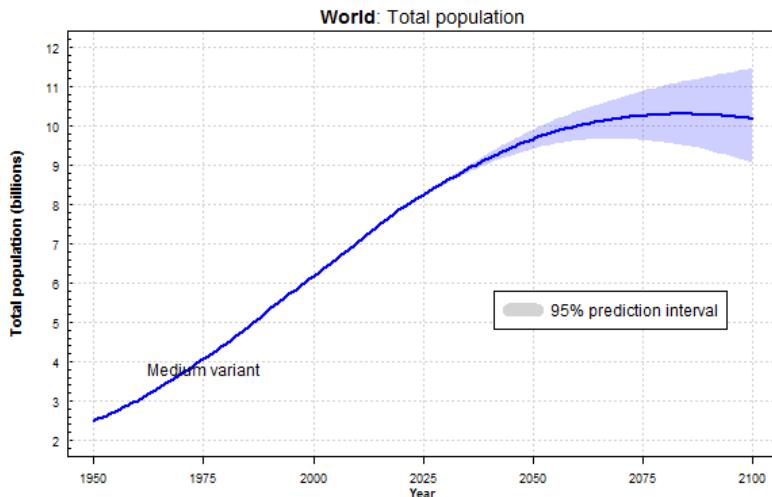
Fuente: https://ourworldindata.org/grapher/population?country=~OWID_WRL

Luego, con el desarrollo de las vacunas a fines del siglo XIX, de los antibióticos durante la década de 1940 y de la medicina moderna, un crecimiento demográfico exponencial nos condujo a seis mil millones en 1999 y a 8 mil millones en noviembre 2022 (UNFPA⁹); y a 8 mil 232 millones en 2025 (UNFPA¹⁰). Las previsiones para la segunda mitad del siglo XXI se sitúan alrededor de 10 mil 300 millones (Figura 7).

⁹ <https://www.unfpa.org/es/8billion>

¹⁰ <https://www.unfpa.org/data/world-population-dashboard>

Figura 7. Crecimiento de la población global 1950 – 2024
y previsiones hacia la segunda mitad del siglo XXI.



Fuente: UN/DESA/PD (2024). *World Population Prospects 2024*.¹¹

En términos ecológicos, este crecimiento demográfico exponencial equivale a la biomasa humana total, cuyo demanda de recursos naturales del Sistema Tierra (ST) constituye el eje de «La Gran Aceleración»¹² (siguiente sección), después de la Segunda Guerra Mundial y hasta la fecha.

1.1.3 El Reporte Meadows

Durante la década de 1960, amplios movimientos sociales en diversos puntos del globo, especialmente los movimientos estudiantiles de 1968 en contra de la guerra y a favor de las libertades democráticas, configuraron una nueva manera de ver el mundo. 1968 coincidió con el nacimiento del Club de Roma¹³, creado por un puñado de especialistas —entre otros Aurelio Peccei, un industrial italiano y Alexander King, un científico escocés ex Director General de Asuntos Científicos en la OCDE—, preocupados por los impactos del

¹¹ <https://population.un.org/wpp/graphs?loc=900&type=Demographic%20Profiles&category=Line%20Charts>

¹² <https://www.stockholmresilience.org/publications/publications/2016-04-18-the-trajectory-of-the-anthropocene-the-great-acceleration.html>

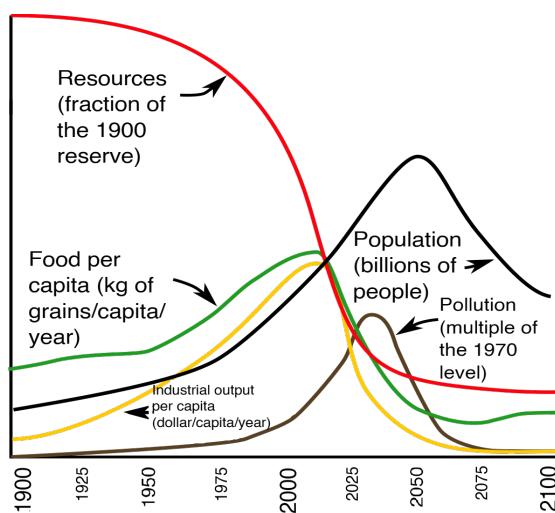
¹³ <https://www.clubofrome.org>

crecimiento exponencial de la economía mundial para el futuro a largo plazo. Constituido formalmente en 1970, en Suiza, el Club de Roma decidió solicitar a un grupo de investigadores del MIT un estudio sobre los límites del crecimiento.

Este estudio dio lugar al famoso reporte «*The Limits to Growth*» (Donella Meadows *et al.*, 1972), publicado el mismo año en el que tuvo lugar la primera gran cumbre de las Naciones Unidas sobre medio ambiente y desarrollo, en Estocolmo, Suecia. No hay duda de que la publicación de este reporte influyó en la realización de esta cumbre mundial y que, desde entonces, ha nutrido las preocupaciones ante la imparable política económica neoliberal dominante que promueve el crecimiento físico de la economía, indefinidamente, como indispensable receta para asegurar la prosperidad y el progreso.

El estudio fue pionero en el uso de herramientas de computación, utilizando World3¹⁴, un modelo de dinámica de sistemas diseñado para simular las interacciones entre cinco variables: industrialización, crecimiento poblacional, calidad de la nutrición, agotamiento de los recursos no renovables y degradación ambiental por contaminación.

Figura 8. Gráfico resultante del escenario tendencial del modelo World3.



Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/The_Limits_to_Growth#/media/File:Limits_to_Growth_fig_49.png

¹⁴ <https://www.clubofrome.org/blog-post/herrington-world-model/>

El modelo configuró un escenario tendencial¹⁵ (Figura 8) que: (1) considerando que los stocks de los recursos no renovables son finitos, decrecerían durante todo el periodo 1900 – 2100; (2) la alimentación per cápita y la producción industrial per cápita continuarían su crecimiento hasta principios del siglo XXI; y (3) la degradación ambiental por contaminación —resultante del crecimiento industrial y de la producción alimentaria— alcanzaría un máximo durante la década de 2030. De tal modo que la población global continuaría creciendo hasta los años 2050. Después, sobrevendría el decrecimiento hacia el colapso¹⁶.

El reporte indica que diversas corridas del modelo con diferentes valores de las variables, de tal modo que una u otra se modificara respecto del escenario tendencial de línea base, permitió explorar en qué condiciones sería posible amortiguar el decrecimiento que condujera hacia el colapso. Si las variables población e industrialización continuaban creciendo, todas las corridas del modelo conducían al colapso, incluso si existieran mayores stocks de recursos no renovables, mayor control de la contaminación, mayor productividad agrícola y mejor control de la natalidad. Solamente si las variables poblacional e industrial dejaban de crecer, antes de finalizar el siglo XX —con la aplicación de políticas estabilizadoras—, parecía posible alcanzar un estado de «estabilidad» ecológica-económica, una sociedad sostenible.

En conclusión, podían considerarse dos escenarios más significativos: uno, el tendencial (Figura 8), en el que no se modifican las tendencias dominantes (con datos hasta 1970) de crecimiento exponencial de la producción y del consumo¹⁷, de tal modo que los límites del crecimiento se rebasarían durante el siglo XXI, imponiendo una reducción de la población global y de la capacidad industrial; otro, el escenario alternativo óptimo (Figura 9), en el que sí se modifican las tendencias dominantes de crecimiento poblacional e industrial, de tal modo que se logra una ruta hacia la estabilidad ecológica y económica, sostenible hacia un

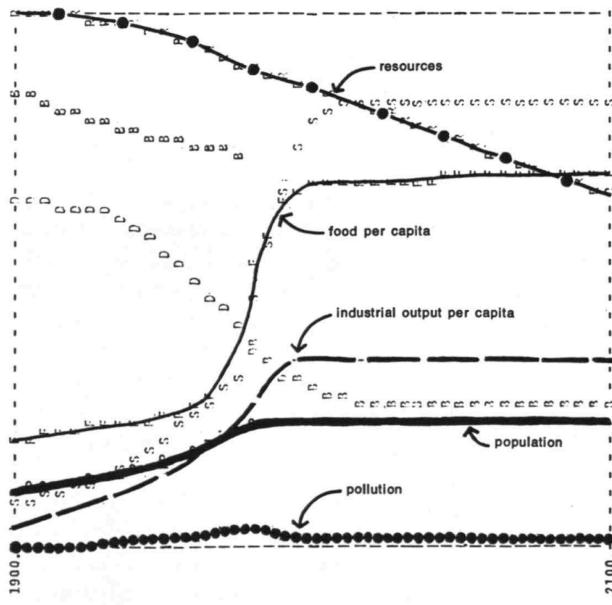
¹⁵ En el estudio este escenario se denomina «*standard world model*» y corresponde a su figura 35.

¹⁶ Aquí, «colapso» indica el punto de quiebre del metabolismo industrial si todo continúa *business as usual*.

¹⁷ Ver más adelante sección sobre «La Gran Aceleración».

futuro de largo plazo —aunque, nótese, incluso en este caso el stock de recursos no renovables continúa reduciéndose hasta su agotamiento (en algún momento del siglo XXII, extrapolando esa curva hacia el futuro).

Figura 9. Gráfico del escenario (óptimo) de estabilidad ecológica y económica.¹⁸



Fuente: *The Limits to Growth* (Meadows, D. et al 1972, figura 46).

Como todo modelo, el World3 constituía una simplificación de la realidad al considerar solamente cinco variables y sus hallazgos solamente indicaban tendencias generales. Pero los autores decidieron publicarlo por la relevancia de los resultados para los tomadores de decisiones y porque, sobre todo, nada permitía suponer que las tendencias dominantes pudieran modificarse sustancialmente en el futuro previsible.

La idea de que el mundo real impone límites al crecimiento fue mal recibida por la mayoría de los economistas, empresarios y hacedores de políticas públicas; incluso por las iglesias, en el caso del crecimiento demográfico. Las críticas sobre el reporte original y sus

¹⁸ En el estudio este escenario se denomina «*stabilized world model I*» y corresponde a su figura 46.

subsecuentes ediciones y revisiones¹⁹ provienen de diversas disciplinas, sobre todo de la economía, que descalifica la metodología del World3 por considerarla una simplificación excesiva del sistema socioambiental global y por omitir variables claves. Los economistas neoclásicos señalaron, particularmente, que el modelo omitía los mecanismos de autorregulación de los mercados. También se ha considerado que sus hipótesis sobre el agotamiento de stocks de recursos no renovables son excesivamente pesimistas, además de omitir el rol de la innovación y del progreso tecnológico, que permitirían desacoplar el crecimiento económico respecto del consumo de recursos, así como sustituirlos.

En todo caso, prevalece un desacuerdo generalizado sobre que el crecimiento económico debiera limitarse pronto, pero nadie, en su sano juicio, puede demostrar que el crecimiento físico del sistema económico pueda continuar para siempre en un planeta de recursos limitados. Ni siquiera los tecno-optimistas, convencidos de que el desarrollo tecnológico podrá resolver el agotamiento de recursos, la contaminación y la producción alimentaria para siempre.

Para documentar por qué el crecimiento no puede continuar para siempre, las siguientes secciones exponen información básica sobre la Gran Aceleración, el flujo de materiales a través del sistema económico, la huella ecológica y el concepto de Antropoceno, a fin de aterrizar en el paradigma del desarrollo sostenible.

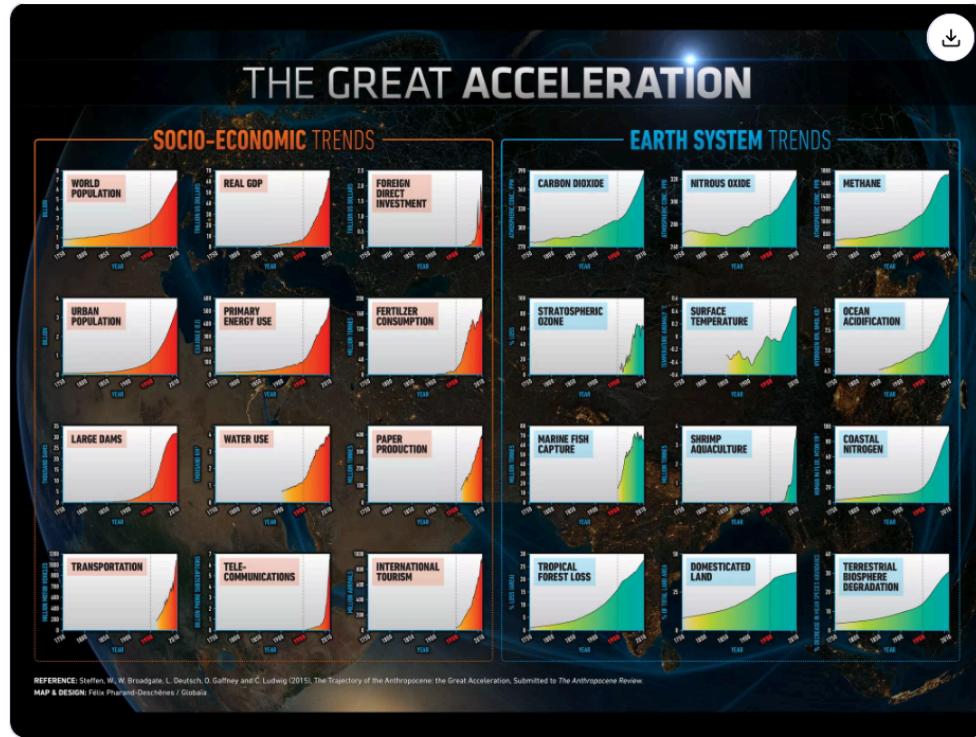
1.2 La Gran Aceleración

Se ha denominado «Gran Aceleración» a la vertiginosa expansión demográfica y económica que ha tenido lugar a partir del fin de la Segunda Guerra Mundial y que ha producido inmensos impactos ambientales adversos. Esta expansión y sus impactos se explican

¹⁹ *Beyond the Limits* se publicó en 1992; *The Limits to Growth: The 30-Year Update* se publicó en 2004; en 2012, Jørgen Randers publicó *2052: A Global Forecast for the Next Forty Years*; y, en 2022, Dennis Meadows, Jørgen Randers y 19 colaboradores más publicaron *Limits and Beyond*.

mediante doce indicadores socioeconómicos y doce indicadores de la situación ambiental del Sistema Tierra.

Figura 10. La «Gran Aceleración» 1750 – 2010.²⁰



Fuente: <https://fr.slideshare.net/slideshow/great-acceleration-2015/43547922>

Los gráficos originales, publicados en 2004, ilustraban la expansión socioeconómica y sus impactos en el Sistema Tierra durante el periodo entre 1750 y 2000. Posteriormente se actualizaron hasta 2010, diferenciando la contribución de los países OCDE respecto de los países de economías emergentes y del resto del mundo. Todas las tendencias socioeconómicas muestran que la gran empresa humana global continúa creciendo rápidamente, así como que, mientras el mayor crecimiento demográfico ha tenido lugar en países no OCDE, el crecimiento del PIB y, por consiguiente, del consumo, continúa dominado por los países OCDE (Steffen *et al*, 2015).

A la vista de que el crecimiento de la población, del PIB y del consumo global muestran una tendencia de crecimiento exponencial durante los últimos 75 años, queda claro por qué el impacto humano en el Sistema Tierra ha alcanzado una dimensión colosal en algunos de los procesos planetarios típicos del Holoceno, dando lugar al advenimiento de una época en la que la humanidad desarrolló la capacidad de modificarlos a escala planetaria.

1.2.1 Flujo global de materiales

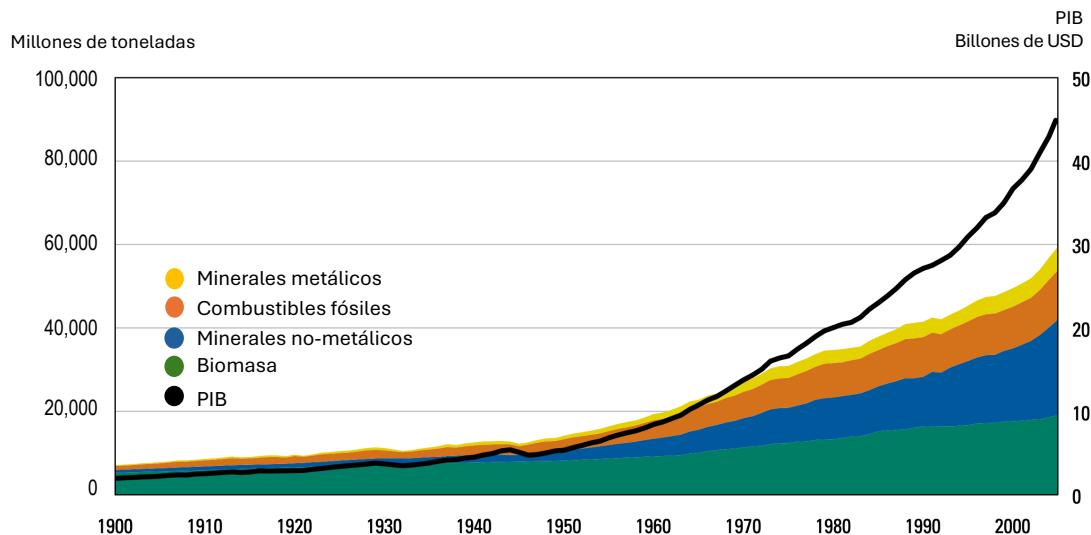
Al expresar el crecimiento económico en términos monetarios, el PIB invisibiliza las tasas de extracción de recursos naturales y el flujo real de materiales a través de la economía. Por consiguiente, en 2007 el Programa de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente²¹ (UNEP, por sus siglas en inglés) constituyó el Panel Internacional sobre Recursos²² (IRP, por sus siglas en inglés), para crear y compartir los conocimientos necesarios que permitan disponer de una **contabilidad del flujo de materiales**, con la misión de reducir el impacto ambiental por la explotación de recursos naturales en todo el mundo. UNEP/IRP publicaron en 2011 un primer análisis sobre el desacoplamiento de la intensidad de extracción de recursos por el crecimiento económico respecto de su impacto ambiental (UNEP, 2011) y, recientemente, una prospectiva global sobre el uso de recursos (UNEP, 2024). Incluso la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, por sus siglas en inglés) publicó, en 2018, una prospectiva global hacia 2060 sobre el uso de recursos materiales, los determinantes económicos y las consecuencias ambientales (OECD, 2018).

Para el análisis del flujo de materiales a través de la economía, los reportes mencionados (UNEP, 2011; OECD, 2028; y UNEP, 2024) distinguen cuatro tipos de recursos naturales: biomasa, combustibles fósiles, minerales metálicos y minerales no metálicos. Las tendencias de crecimiento observadas durante el siglo XX y hasta 2005, se presentan en la Figura 11, de 1970 a 2024 en la Figura 12 y el pronóstico de crecimiento hacia 2060 en la Figura 13.

²¹ United Nations Environment Programme.

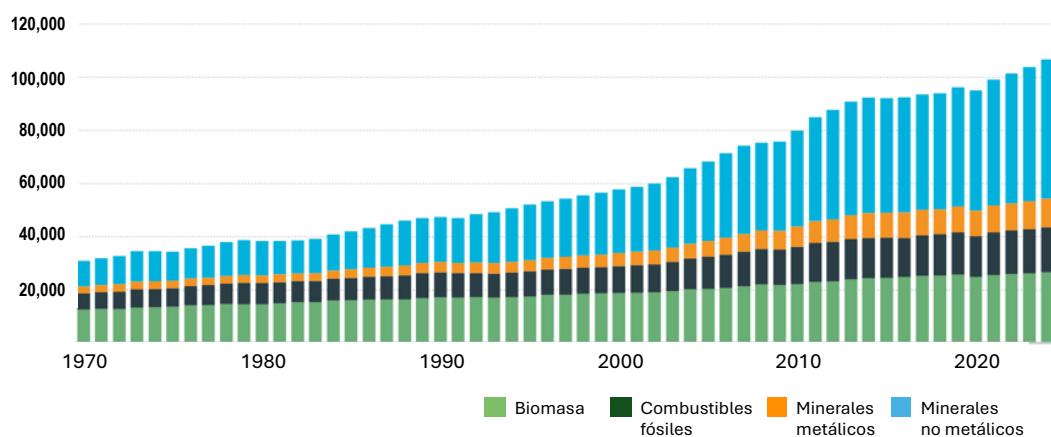
²² <https://www.resourcepanel.org/about-us>

Figura 11. Extracción global de materiales 1900 – 2005, en millones de toneladas; PIB en billones de dólares estadounidenses (USD).



Fuente: UNEP 2011, figura 2, p. xiv.

Figura 12. Extracción global de materiales 1970 – 2024, en millones de toneladas.

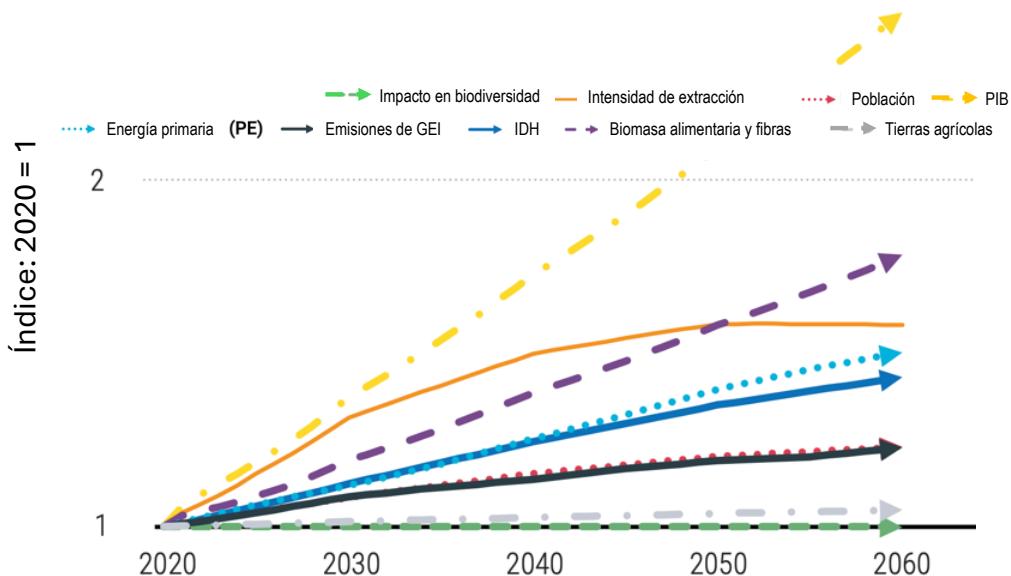


Fuente: UNEP 2024, figura 2.9, p. 26.

Durante el siglo XX, el crecimiento en la extracción se multiplicó por ocho, a mayor velocidad a partir de 1950 (la Gran Aceleración), pasando de poco más de 7 mil millones de toneladas a casi 60 mil millones; y durante los últimos cincuenta años la extracción pasó de

poco más de 30 mil millones de toneladas a más de 100 mil millones. Es decir, durante los últimos 124 años el flujo de materiales a través de la economía se ha multiplicado por 14.

Figura 13. Índice prospectivo de extracción de materiales 2020 – 2060, 2020 = 1



Fuente: UNEP 2024, figura 4.3, *Historical Trends*, p. 84.

El crecimiento en el uso de recursos naturales constituye el principal factor causante de la triple crisis ambiental planetaria (cambio climático, pérdida de biodiversidad, estrés hídrico). A un ritmo de crecimiento de 2.3 por ciento anual (Figura 12), durante los últimos 50 años el uso de materiales se ha más que triplicado. Los impactos adversos en el sistema climático y en la biodiversidad por la extracción y procesamiento de materiales excede con mucho las metas de limitar a +1.5 Centígrados el incremento de la temperatura global y de evitar la pérdida de biodiversidad.

Y el pronóstico del IRP señala que (Figura 13), aunque el Índice de Desarrollo Humano (IDH) promedio global podría mejorar hacia el horizonte de 2060, los demás factores de presión continuarán creciendo (PIB, intensidad de extracción de recursos materiales, población, demanda de energía primaria, emisiones de gases de efecto invernadero, uso de tierras para la agricultura y demanda de biomasa).

El cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)²³ está condicionado a desacoplar el incremento de los impactos ambientales respecto del crecimiento económico y el flujo de materiales. Pero el quid del problema es que los países de mayores ingresos utilizan seis veces más materiales per cápita que los países de menores ingresos (UNEP, 2024). De modo que la reducción en el uso de recursos y los impactos ambientales adversos globales asociados sólo será posible si se reduce la desigualdad mundial en el uso de materiales per cápita, lo que implica que los países de mayores y medianos ingresos debieran reducir su consumo drásticamente.

La contabilidad de flujo de materiales refuerza los resultados del análisis de la «Gran Aceleración» (sección anterior), así como complementa la contabilidad del PIB (expresada en precios de mercado), abriendo la posibilidad de llevar a cabo estudios fundamentales de economía ecológica, en términos de flujo de energía y materiales a través de la economía, tal y como sucede en los ecosistemas (Figura 4) —habida cuenta que la economía no es otra cosa que un subsistema del sistema planetario biosfera (Figura 43).

1.2.2 Rebase ecológico planetario

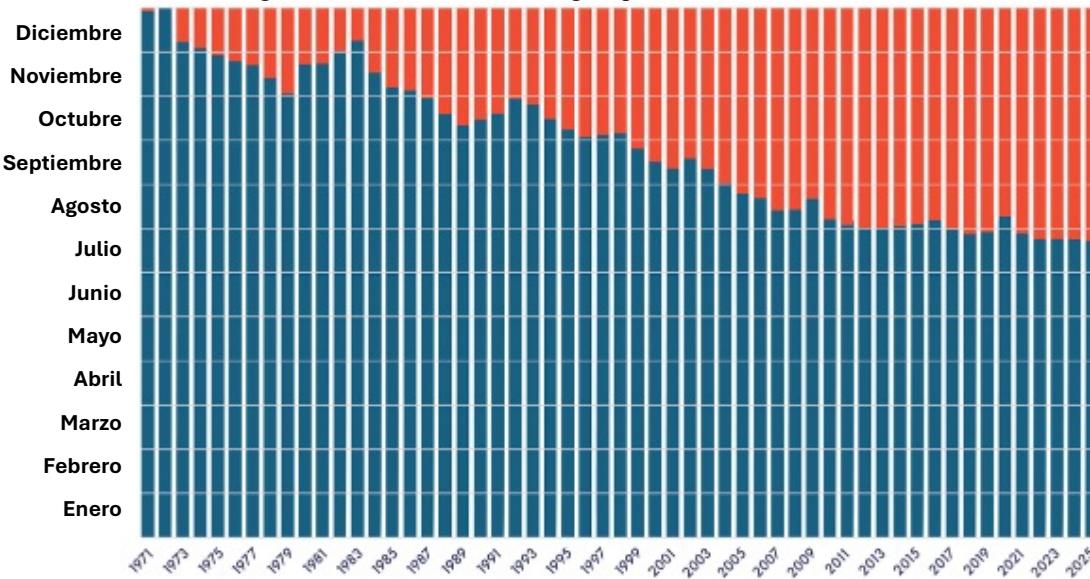
En su tesis doctoral de la Universidad de Columbia Británica, Mathis Wackernagel (1994) lanzó el concepto de huella ecológica y desarrolló el método para medirla. A partir de entonces, esta medida ha dado la vuelta al mundo y se ha instalado como uno de los grandes referentes en el debate sobre los límites del crecimiento²⁴. Con base en resultados históricos de huella ecológica, por país y mundial, el **día del rebase ecológico planetario** constituye una medida para establecer la fecha en que la economía global consume lo que la biocapacidad del Sistema Tierra puede ofrecer, cada año. Es decir, después de tal fecha la humanidad vive de prestado al futuro (consume capital natural, en vez de sólo sus «réditos»). La tendencia muestra que, durante los últimos 74 años (Figura 14) que se dispone de

²³ En 2015, la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, con 17 ODS que constituyen el plan para lograr un futuro sostenible para todos. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

²⁴ <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>

mediciones, cada año más tempranamente agotamos los recursos disponibles de ese año. En 2025 esta fecha cayó el 24 de julio (*Earth Overshoot Day*²⁵) (González-Dávila, G. 2025).

Figura 14. Día del rebase ecológico planetario 1971 – 2025.



Fuente: <https://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day/>

Desde una perspectiva económica se trata de una (inmensa) falla de mercado, porque si debiéramos vivir de las capacidades de renovación de los ecosistemas y la biosfera en su conjunto (los réditos del capital natural global), lo que estamos haciendo es consumir el capital mismo y, por consiguiente, reduciendo la biocapacidad del Sistema Tierra para regenerar sus recursos (producir «réditos»). Y aunque no sea posible atribuir un valor absoluto de mercado al patrimonio natural y los bienes comunes que ofrece, el concepto de «capital natural» permite la formulación y aplicación de políticas económicas ambientales; Se trata de uno de los instrumentos más útiles de política para la regulación ambiental.

²⁵ <https://overshoot.footprintnetwork.org/newsroom/press-release-2025-english/>

1.2.3 Antropoceno

En 1980, Eugene Stoermer, un biólogo norteamericano estudioso de las diatomeas del Pleistoceno²⁶, a la vista de los cambios fundamentales y crecimiento descomunal del sistema socioeconómico global —al ritmo de La Gran Aceleración—, que habían conducido al rebase de la capacidad de carga de la biosfera más allá de los rangos de variabilidad del Holoceno, propuso el término de «Antropoceno». Poco después, a principios del siglo XXI, el término se generalizó cuando el meteorólogo holandés Paul Crutzen, premio Nobel de química 1995, lo utilizó para señalar que la influencia humana en la atmósfera terrestre durante los últimos siglos constituía una nueva época geológica.

El Antropoceno sería un nuevo periodo geológico, consecutivo al Holoceno, que da cuenta del significativo impacto global que las actividades humanas han tenido sobre los ecosistemas terrestres, especialmente ilustradas por la extinción masiva de la megafauna durante el Pleistoceno Tardío y principios del Holoceno, el cambio de uso de suelo con la revolución agrícola y, a partir de la revolución industrial, con el cambio climático y la pérdida de biodiversidad en curso. No hay acuerdo común respecto a la fecha precisa de su inicio; algunos consideran que sería a finales del siglo XVIII con la Revolución Industrial; otros sugieren su inicio al comienzo de la agricultura; y otros más a partir de la huella nuclear de la Segunda Guerra Mundial y la Gran Aceleración que le siguió.

Por su parte, el Holoceno —término utilizado desde 1867— sí tiene un inicio formal, definido por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS)²⁷ desde 2008, establecido con fundamento en una sección de estratotipo y punto de límite global (GSSP por sus siglas en inglés)²⁸ datado en $11\text{ mil }700 \pm 99$ años antes del año 2000.

²⁶ Época geológica caracterizada por ciclos glaciares e interglaciares, que va de hace 2,58 millones de años —época de la aparición del género *Homo*— a 11 mil 700 antes del presente; y que se corresponde con el Paleolítico arqueológico.

²⁷ <https://www.iugs.org>

²⁸ Global Boundary Section Stratotype and Point: <https://stratigraphy.org/gssps/>

No obstante que la propuesta del «Antropoceno» como concepto histórico-geológico ha ganado fuerza con la publicación de muchos artículos en revistas científicas que la apoyan, su existencia oficial requiere la aprobación de la Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS)²⁹ —de la misma IUGS—, que es la autoridad en la materia. La no aprobación, hasta la fecha, en calidad de nueva unidad cronoestratigráfica de la escala estándar global, se debe a que la burocracia directiva actual de la IUGS ha menospreciado la propuesta considerando que el registro estratigráfico correspondiente a este corto intervalo temporal es extremadamente reducido, de modo que consideran al «Antropoceno» más como una declaración política que una propuesta científica.

Sea como sea, la denominación del «Antropoceno» caracteriza a nuestra época, pues ya resulta indudable que *Homo sapiens* desarrolló la capacidad de influir en el funcionamiento del Sistema Tierra, de manera adversa para su propia supervivencia. De todas las fechas consideradas para marcar el inicio del Antropoceno, el comienzo de la Gran Aceleración parece resultar la más adecuada.

1.3 Sostenibilidad y desarrollo sostenible

La progresiva toma de conciencia sobre los límites biofísicos que impone la biosfera a las actividades humanas, acompañada de una creciente brecha de desigualdad —resultante del modelo dominante de crecimiento económico de post guerra—, condujo a proponer el concepto de desarrollo sostenible y el **paradigma de la sostenibilidad**.

Entre sus antecedentes destaca la publicación del primer reporte sobre la situación ambiental mundial en 1951, por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza³⁰

²⁹ <https://stratigraphy.org>

³⁰ Creada en 1948, actualmente la IUCN es la más grande red internacional ambientalista. Reúne a más de mil 400 organizaciones y 17 mil expertos, constituyendo una autoridad global sobre el estado de la naturaleza.

<https://iucn.org/about-iucn>

(IUCN, 1951), con financiamiento de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés), que contenía información de setenta países sobre suelos, aguas, flora, fauna, minerales y reservas de recursos naturales, así como de organizaciones activas en estos temas y sobre la participación en convenciones internacionales ambientales³¹. También destaca «La Primavera Silenciosa» (Carson, R. 1962), de la bióloga Rachel Carson, afilada crítica sobre la codicia y la negligencia del ser humano por utilizar plaguicidas irresponsablemente, revelando sus efectos devastadores (el DDT en particular) por la contaminación ambiental y sentando las bases del movimiento ecologista en Occidente. Y por supuesto el reporte, en 1972, sobre los Límites del crecimiento y la Conferencia de Estocolmo, primera cumbre mundial de las Naciones Unidas sobre desarrollo y medio ambiente humano, motivada por la aspiración a un ecodesarrollo, que lanzó el establecimiento de ministerios de medio ambiente en el mundo y, en 1983, que las Naciones Unidas crearan la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo (WCED)³².

1.3.1 Ecodesarrollo o desarrollo sostenible

La **definición formal del desarrollo sostenible** (desarrollo *duradero*, en la traducción oficial original) apareció en *Nuestro destino común* (WCED, 1987, p. 59) (también conocido como «Reporte Brundtland»): «*el desarrollo duradero es el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades*»; considerando dos condiciones fundamentales: «*el concepto de “necesidades”, en particular las necesidades esenciales de los pobres, a las que se debía otorgar prioridad preponderante*»; y «*la idea de limitaciones impuestas por la capacidad del medio ambiente para satisfacer las necesidades presentes y futuras*».

³¹ La información sobre México se encuentra en las páginas 448 a 452.

³² <https://sustainabledevelopment.un.org/milestones/wced>

Esta definición marcó un hito porque relanzó el debate acerca de cómo debía entenderse el crecimiento económico y la prosperidad para todos; y se consolidó durante la Cumbre de Río 1992 con la Agenda 21 y el establecimiento de los tres acuerdos ambientales multilaterales que marcaron la época: la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)³³; el Convenio sobre Diversidad Biológica (CDB)³⁴; y la Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la Desertificación (CNULD)³⁵.

Con la intención de cumplir las aspiraciones internacionales multilaterales declaradas para lograr un desarrollo sostenible, las Naciones Unidas lanzaron, en el año 2000, los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM)³⁶; y, en 2015, la Agenda 2030 con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)³⁷.

Resulta relevante subrayar que el concepto de «desarrollo sostenible» fue resultado de un compromiso en el seno de la WCED frente al concepto de **ecodesarrollo**³⁸, que colocaba en el centro de la atención la integridad de los ecosistemas —sostenibilidad fuerte (ver más adelante)—, por considerarse demasiado radical y limitante. Concepto propuesto por Maurice Strong —secretario general, de 1970 a 1972, de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano— y popularizado por el economista franco-polaco Ignacy Sachs³⁹. El codesarrollo aspiraba a reconciliar el desarrollo económico con la naturaleza, respetando los límites biofísicos de los ecosistemas locales; pero como esto implicaba imponer límites al crecimiento económico —particularmente de los países ricos— la WCED prefirió adoptar el concepto de «desarrollo sostenible», que mantenía el crecimiento económico como condición del desarrollo.

³³ <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

³⁴ <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf>

³⁵ https://www.unccd.int/sites/default/files/2022-02/UNCCD_Convention_text_SPA.pdf

³⁶ <https://www.un.org/millenniumgoals/>

³⁷ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

³⁸ <https://www.unescwa.org/sd-glossary/eco-development>

³⁹ <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89%C3%A9cod%C3%A9veloppement>

1.3.2 Sostenibilidad débil y sostenibilidad fuerte

De tal manera, el desarrollo sostenible reconoce tres pilares: económico, social y ambiental, otorgando a los tres la misma importancia; y parte del principio que no se trata de limitar el crecimiento económico, sino de hacerlo durable —sostenible— en el tiempo. En pocas palabras, en tanto que el ecodesarrollo planteaba adaptar la economía a los límites biofísicos que impone el planeta, el desarrollo sostenible plantea la posibilidad de conciliar el crecimiento económico con estos límites.

Sin embargo, a pesar de que el ecodesarrollo fue prácticamente borrado del mapa, el debate ha continuado en el marco del concepto de sostenibilidad. Una diversidad de perspectivas ha llevado a configurar toda una tipología de modelos conceptuales⁴⁰ sobre el desarrollo sostenible, que conducen a entender e implementar la sostenibilidad de diversas maneras. Aquí revisaremos sólo tres de ellos⁴¹, para explicar la diferencia en sostenibilidad débil y sostenibilidad fuerte.

El modelo conceptual de origen (Reporte Brundtland) considera tres componentes del desarrollo: una económica, otra social y otra ambiental; cuya resultante puede ser sostenible a condición de que:

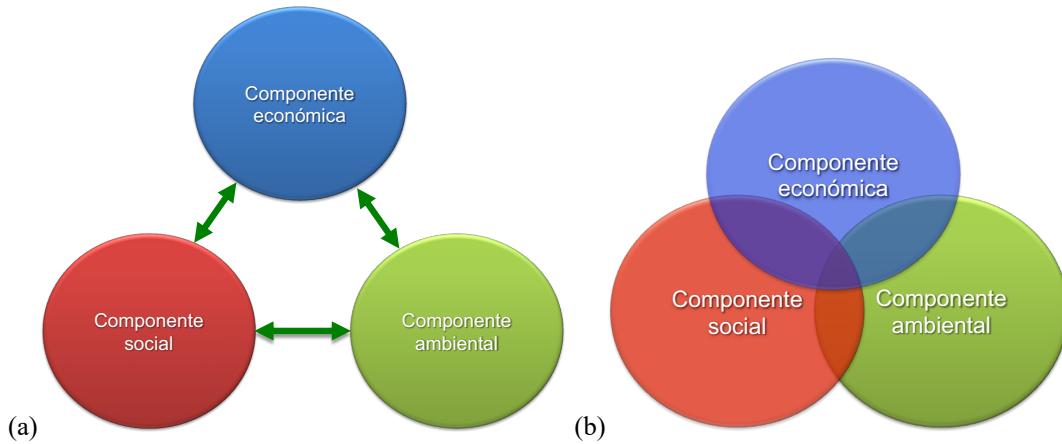
- la económica logre viabilidad del crecimiento a largo plazo, con responsabilidad y eficiencia, y genere la prosperidad sin dañar a las otras dos componentes.
- la social logre la equidad social, el bienestar, calidad de vida, salud, educación, cultura, de tal manera que se satisfagan las necesidades de todas las personas de la generación presente y de las generaciones futuras.
- y la ambiental logre proteger los recursos naturales, preservar la biodiversidad, mitigar el cambio climático, vivir dentro de los límites de los ecosistemas

⁴⁰ Barton, J. & Gutiérrez-Antinopai, F. 2020. *Towards a Visual typology of Sustainability and Sustainable Development*. *Sustainability* 2020, 12(19), 7935; <https://doi.org/10.3390/su12197935>

⁴¹ <https://evs.institute/environmental-management/three-models-sustainable-development-theory-practice/>

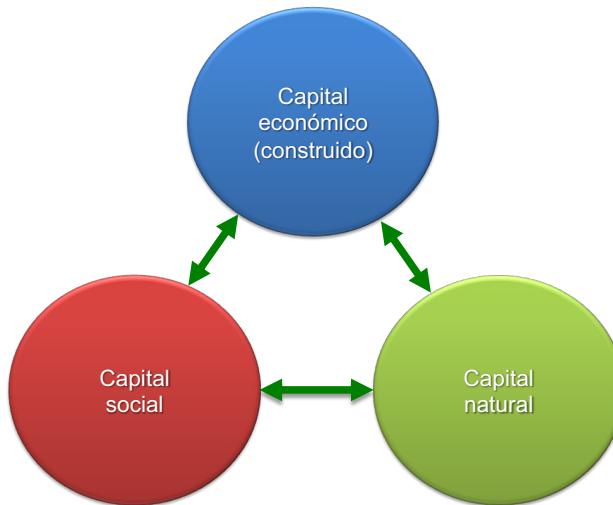
De acuerdo con esto, para lograr un desarrollo realmente sostenible es indispensable que las decisiones de política y las acciones económicas sean respetuosas del medio ambiente, socialmente equitativas y económicamente viables.

Figura 15. Dos representaciones de las tres componentes del desarrollo sostenible.



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Los tres tipos de capital asociados a los componentes del desarrollo sostenible.



Fuente: elaboración propia.

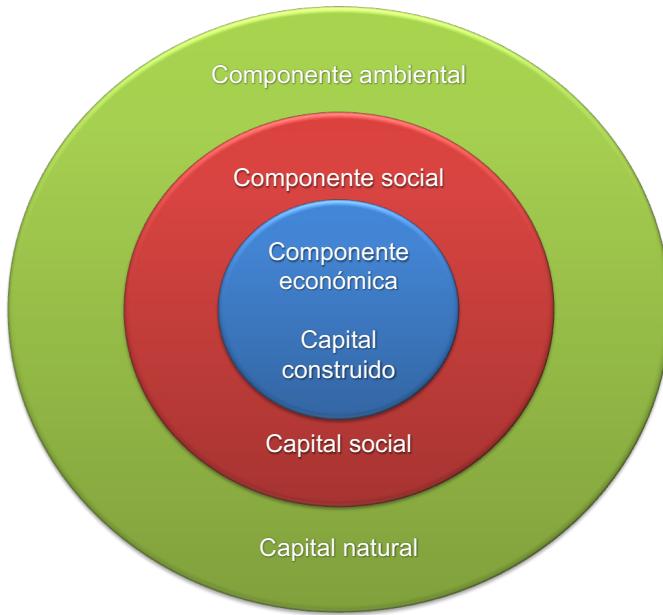
A estas tres componentes se encuentran asociados tres tipos de capital: económico, o construido; humano, que es el trabajo, conocimientos, ingenierías, instituciones; y natural, los ecosistemas y sus servicios.

Sin embargo, en este modelo resulta aceptable la sustituibilidad entre capitales y la sostenibilidad se cumple si la suma (C_{TOTAL}) de capitales natural (CN), social (CS) y económico (CE) se mantenga constante a través del tiempo t . Es decir, el desarrollo será sostenible cuando:

$$\begin{aligned} C_{TOTAL} &= (CE)_t + (CS)_t + (CN)_t = (CE)_{t+1} + (CS)_{t+1} + (CN)_{t+1} \\ &= \dots, = (CE)_{t+n} + (CS)_{t+n} + (CN)_{t+n} = C_{TOTAL} \end{aligned} \quad 1$$

De tal modo que si el capital natural disminuye a costa del crecimiento del capital económico (típicamente medido mediante el PIB), pero C_{TOTAL} se mantiene a través del tiempo, se considera como desarrollo sostenible. **Ésta es la sostenibilidad débil** (Pearce D. & Atkinson G. 1993).

Figura 17. Modelo de componentes anidados del desarrollo sostenible.



Fuente: elaboración propia con base en Pearce D. & Atkinson G. 1993.

Otro modelo, de enfoque ecológico, es el de componentes interdependientes anidadas (Figura 17), que reconoce que la componente ambiental contiene a la social y ésta, a su vez, a la económica. En realidad, la componente ambiental es la biosfera (Figura 2) —sistema

biofísico finito—, dentro de la cual existe la sociedad humana, dependiente de aquélla (Figura 43). En tanto que la componente económica —subsistema creado por la sociedad para el manejo de recursos y la producción y distribución de bienes y servicios— se encuentra anidada en la componente social.

A diferencia del modelo básico de tres componentes interactuantes, el modelo de componentes interdependientes anidadas no otorga igual importancia a las tres, sino que considera que la componente económica existe para servir a la sociedad y ésta es completamente dependiente de la ambiental. Es decir, no considera válida la sustitución de capital natural, o capital social, con capital construido, ya que ello puede conducir al colapso de la sociedad y, consiguientemente, de la economía. **Ésta es la sostenibilidad fuerte** (Pearce D. & Atkinson G. 1993). Es decir, que el desarrollo será sostenible sólo cuando:

$$(CN)_t \leq (CN)_{t+1} \leq \dots \leq (CN)_{t+n}$$

2

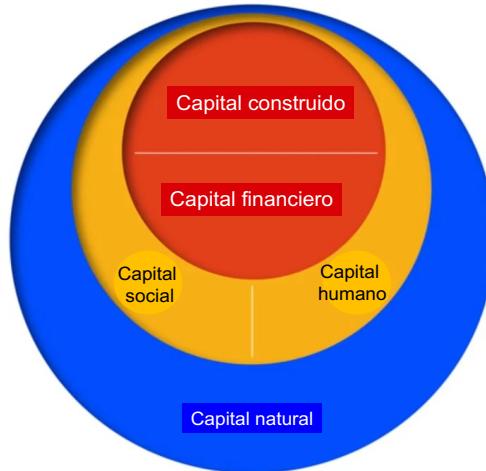
Un tercer modelo, de enfoque económico, es el de stocks de capitales (Figura 18), similar al anterior pero distingue cinco clases: el capital natural (el stock planetario de recursos naturales); el humano (trabajo, conocimientos, habilidades, salud, motivaciones); el social (redes de relaciones institucionales que unen a la sociedad, como la familia, las comunidades, o el estado de derecho); el construido (todas las infraestructuras, urbanas, industriales, de comunicaciones, alimentarias); y el capital financiero (activos monetarios como acciones, bonos, divisas), que representan derechos sobre otras formas de capital.

Finalmente, resulta relevante aclarar la diferencia entre desarrollo sostenible y sostenibilidad⁴². El concepto de sostenibilidad encuentra su antecedente en el de rendimiento sostenido, utilizado en economía de recursos naturales renovables —particularmente en explotación forestal y de pesquerías—, el cual reconoce que es posible mantener indefinidamente la cosecha de un recurso renovable siempre y cuando no se excedan sus

⁴² <https://www.britannica.com/science/sustainability>

capacidades regenerativas. Hoy día, más allá de la escala de ecosistemas, la sostenibilidad fuerte significa no exceder las capacidades regenerativas de la biosfera.

Figura 18. Modelo de stocks de capitales del desarrollo sostenible.



Fuente: elaboración propia a partir de <https://www.forumforthefuture.org/the-five-capitals#>

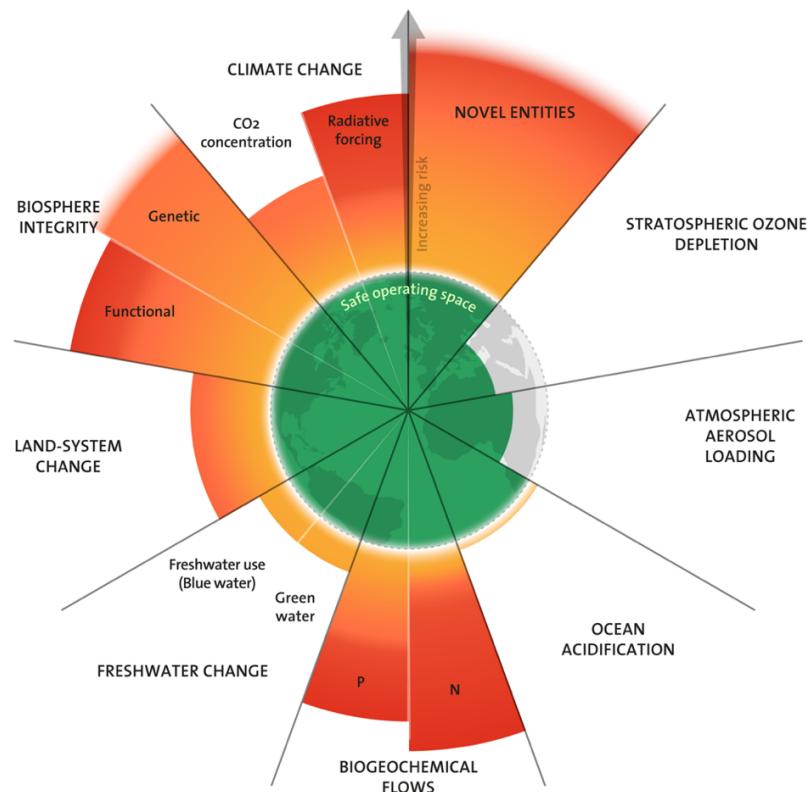
Así, en tanto que la **sostenibilidad es el paradigma**, la meta a alcanzar en algún momento del futuro, el **desarrollo sostenible es el proceso**, la(s) ruta(s) posibles. Por lo que el debate entre los defensores de la sostenibilidad débil (ecuación 1) y los promotores de la sostenibilidad fuerte (ecuación 2) es muy relevante, ya que sólo esta última puede evitar que el crecimiento económico continúe dilapidando el capital natural, degradando y perdiendo el patrimonio natural de la humanidad. Además, hoy día, la denominación de «desarrollo sostenible» se ha vulgarizado al punto que se otorga a muchísimos procesos o acciones, aunque que no vayan en la dirección correcta para alcanzar la sostenibilidad. En esta época de transverdad, abunda el *greenwashing*.

2. Umrales planetarios

2.1 Enfoque interdisciplinario sobre límites planetarios

De la Gran Aceleración al Antropoceno, los impactos globales de nuestra especie modifican procesos del Sistema Tierra. Para medir la dimensión de estos impactos, el Centro de Resiliencia de Estocolmo⁴³ ha desarrollado —con base en los mejores conocimientos científicos disponibles— el enfoque de «Umbrales Planetarios»⁴⁴ (González-Dávila, G. 2017).

Figura 19. Los nueve procesos que regulan el comportamiento de la biosfera en las condiciones del Holoceno. El círculo verde indica el espacio planetario seguro, el ámbar indica zona de riesgo para el mantenimiento de cada proceso y el círculo rojo indica transgresión a sus límites. Siete han sido ya transgredidos.



Fuente: (PBScience, 2025)

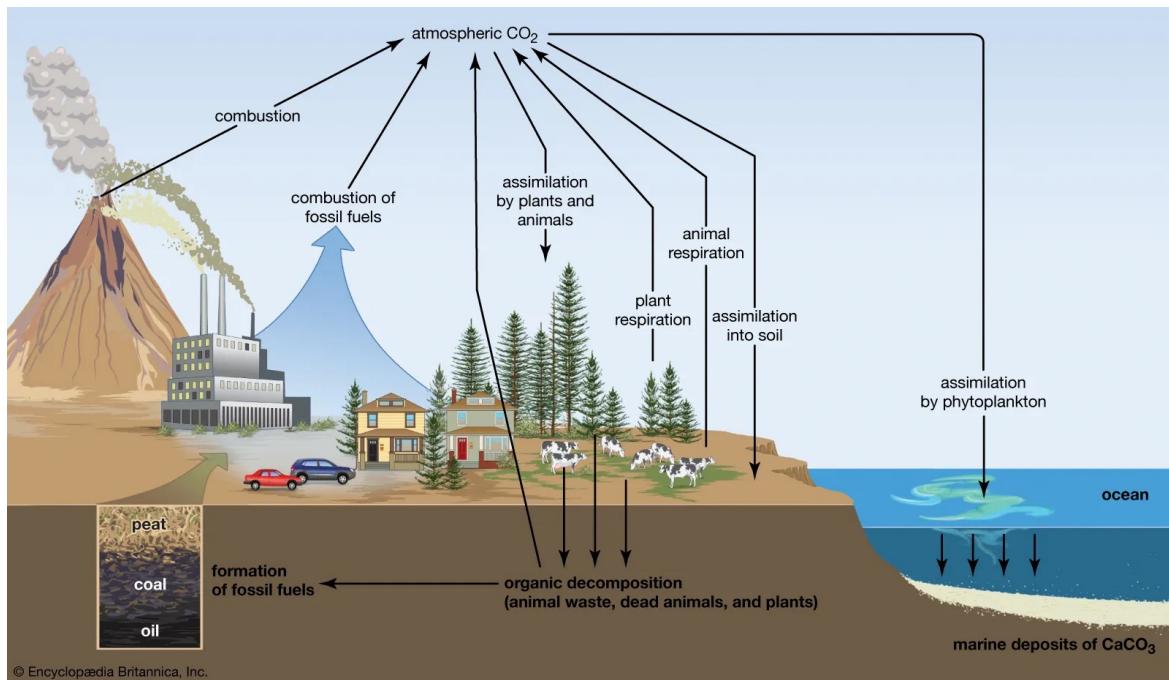
⁴³ <https://www.stockholmresilience.org>

⁴⁴ *Planetary Boundaries*: <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

El análisis de umbrales planetarios identifica procesos clave de la biosfera, explica de manera sencilla los impactos determinantes de las actividades humanas sobre ellos y encuentra los límites dentro de los cuales estos procesos regulan su funcionamiento **en las condiciones del Holoceno**. Se trata de información clave, porque dentro de estos límites ha sido posible el desarrollo de nuestra civilización; si pretendemos mantenernos dentro de un espacio planetario operativo seguro y estable para continuar nuestro desarrollo, ¡no debiéramos interferir ni transgredir los límites del funcionamiento de estos nueve procesos claves!

- i. **Integridad de la biosfera.** Espacio planetario donde habitamos todos los seres vivos (Figura 1), compartiendo sus recursos, interdependientes unos de otros.
- ii. **Cambio climático (interferencia con el ciclo biogeoquímico del carbono).** El carbono fluye entre seres vivos, la atmósfera y la corteza terrestre. Elemento químico clave de las estructuras moleculares de los seres vivos, que lo intercambian permanentemente por respiración O₂, CO₂ y redes tróficas.

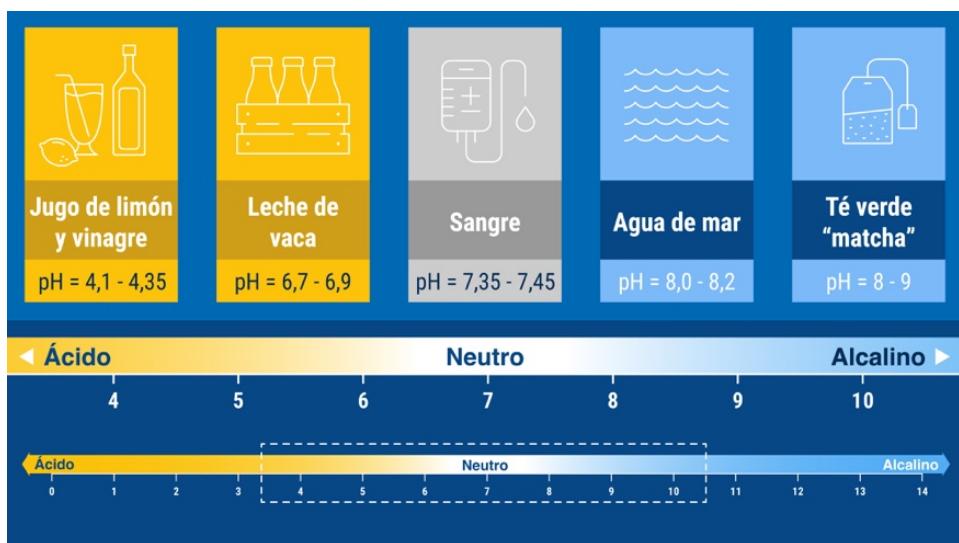
Figura 20. Ciclo biogeoquímico del carbono.



Fuente: <https://www.britannica.com/science/biosphere>

iii. Acidificación de los océanos (interferencia con el ciclo biogeoquímico del carbono). En promedio, el pH⁴⁵ de los océanos es ligeramente alcalino, 8.1, lo que permite a los animales marinos con exoesqueletos calcáreos y conchas puedan construirlos. Pero un tercio del exceso de carbono en la atmósfera se disuelve en los océanos, acidificándolos.

Figura 21. El pH de los océanos es de 8.1 en promedio.

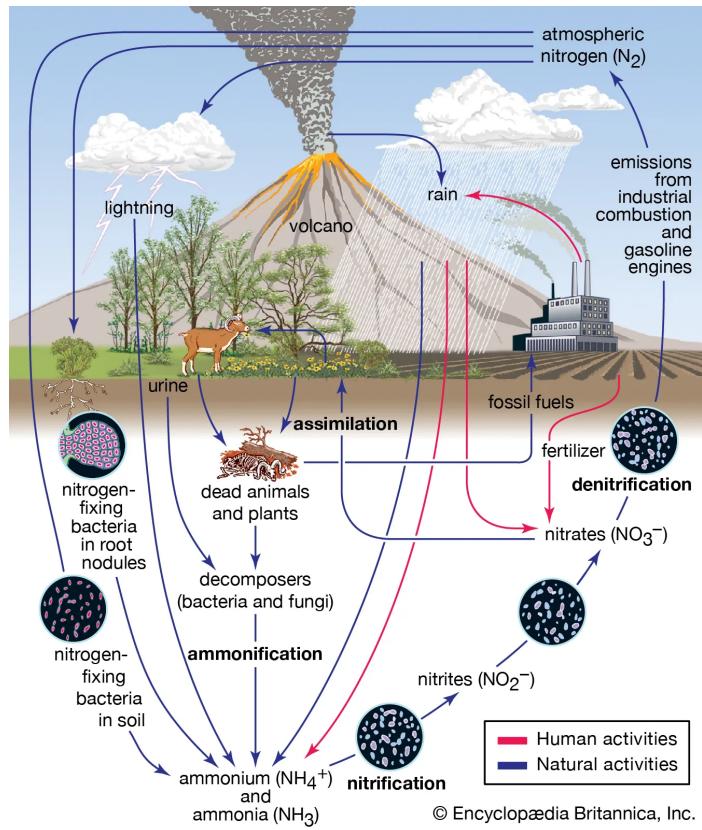


Fuente: IAEA <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/acidificacion-oceanos-deficienicion>

iv. Ciclos biogeoquímicos del nitrógeno y del fósforo (interferencia con ciclos de nutrientes en la biosfera). Elementos que fluyen asimismo entre los seres vivos, la atmósfera y los suelos. Elementos indispensables para todos los seres vivos en la fabricación de proteínas, vitaminas y el ADN —en particular para el crecimiento de las plantas cultivadas.

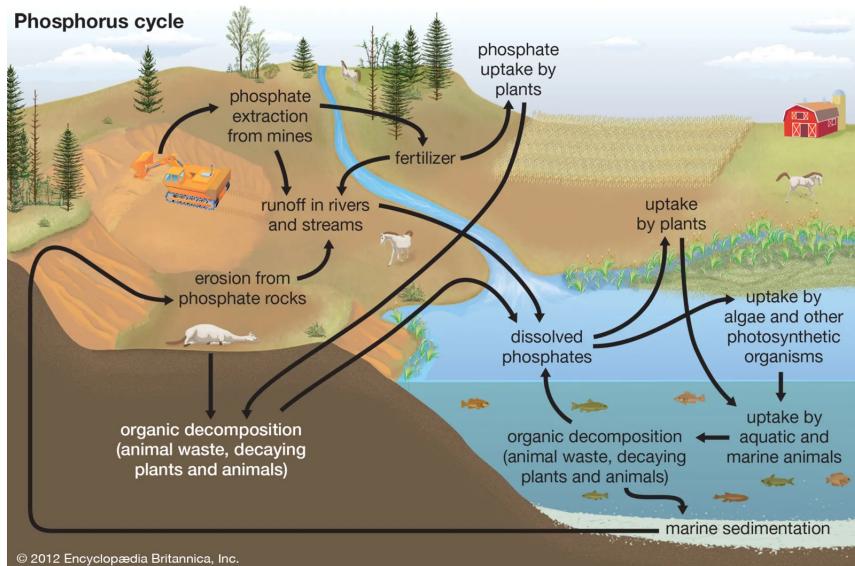
⁴⁵ El potencial de hidrogeniones $[H^+]$ se mide con una escala logarítmica denominada $pH = -\log_{10}[H^+]$, con valores de 0 a 14, donde: 7 es valor neutro (agua, sangre); menor que 7 es ácido (ej: vinagre = 3, limón = 2, ácido gástrico = 1); y mayor que 7 es básico (o alcalino, ej: océanos = 8,1, bicarbonato = 9, jabón = 10, agua clorada = 13).

Figura 22. Ciclo biogeoquímico del nitrógeno (N).



Fuente: <https://www.britannica.com/science/biogeochemical-cycle>

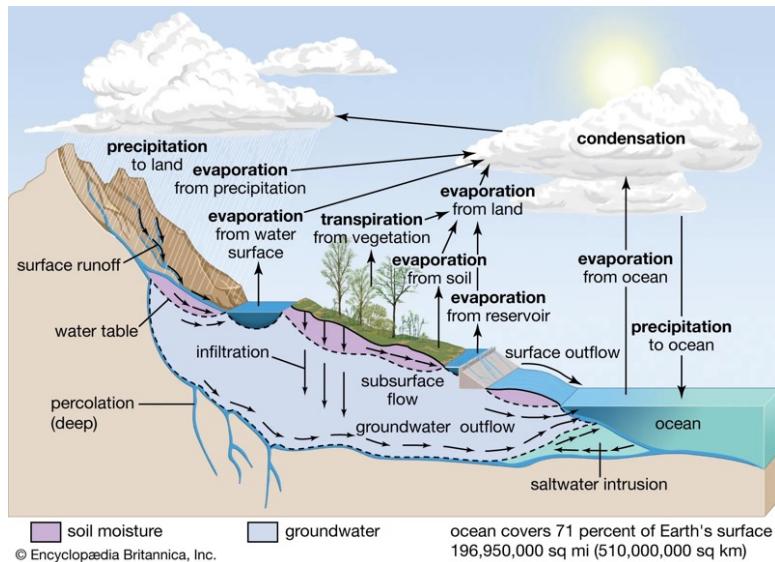
Figura 23. Ciclo biogeoquímico del fósforo (P).



Fuente: <https://www.britannica.com/science/biogeochemical-cycle>

v. **Ciclo del agua.** Que fluye a través de ríos, mares, evaporación, nubes, lluvias, otra vez ríos y, asimismo, a través de todos los seres vivos.

Figura 24. Ciclo biogeoquímico del agua (H_2O).



Fuente: <https://www.britannica.com/science/biogeochemical-cycle>

vi. **Integridad de los suelos.** Los suelos constituyen reservorios de nutrientes, «esponjas» almacenadoras de agua, hábitats de infinidad de organismos que contribuyen a su fertilidad, productores de O_2 y sumideros de carbono; sustrato indispensable para producir nuestros alimentos y la supervivencia de los ecosistemas naturales terrestres.

Figura 25. Los suelos íntegros son suelos sanos y fértiles.



Fuente: <https://blogdefagro.com/agricultura/la-fertilidad-de-suelos-que-es-y-como-promoverla/>

vii. **Integridad ambiental (libre de contaminación).** Indispensable para el mantenimiento de la biodiversidad y el funcionamiento normal de los ecosistemas, sin contaminación por nuevas entidades —artificiales, sean residuos sólidos o líquidos, sustancias venenosas, metales pesados, agroquímicos o plásticos.

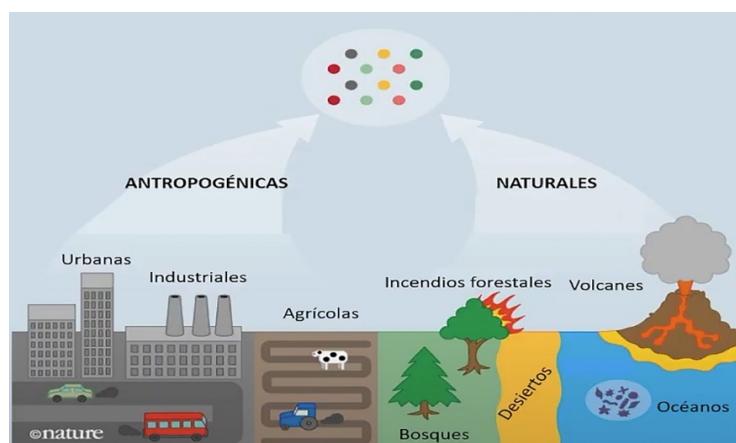
Figura 26. La contaminación ambiental degrada al medio ambiente y daña la salud humana.



Fuente: <https://www.euroinnova.com/ciencias/articulos/infografia-contaminacion-ambiental>

viii. **Carga de aerosoles en la atmósfera.** Micropartículas de fuentes naturales —como polvos de desiertos o de erupciones volcánicas e incendios forestales, esporas, polen, o cristales de sal marina—, o de fuentes humanas —urbanas, industriales o agrícolas—, que influyen en la regulación del clima, del ciclo del agua y en la salud de los ecosistemas.

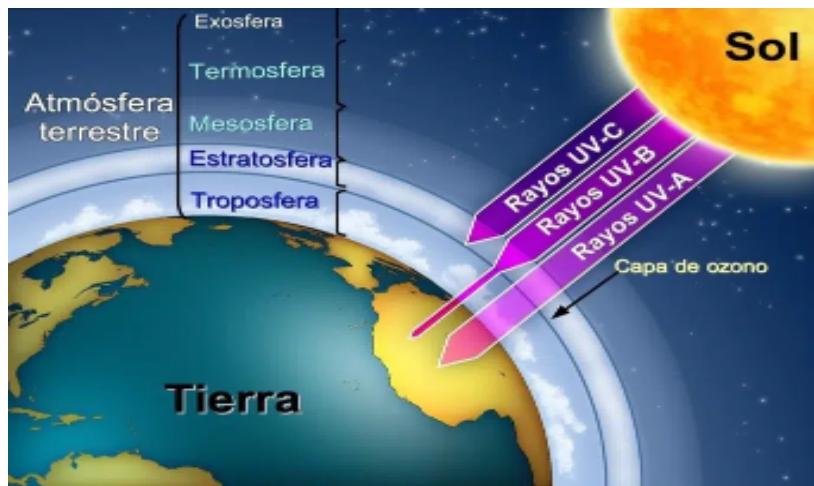
Figura 27. Aerosoles en la atmósfera.



Fuente: <https://www.atmosfera.unam.mx/particulas-de-aerosol-vitales-en-la-formacion-de-gotas-de-nube-y-cristales-de-hielo/>

ix. **Capa de ozono.** Capa de O₃ en la parte baja de la estratosfera que nos protege de los rayos ultravioleta, dañinos para los seres vivos y la salud humana.

Figura 28. La capa de ozono nos protege de los rayos ultravioleta.



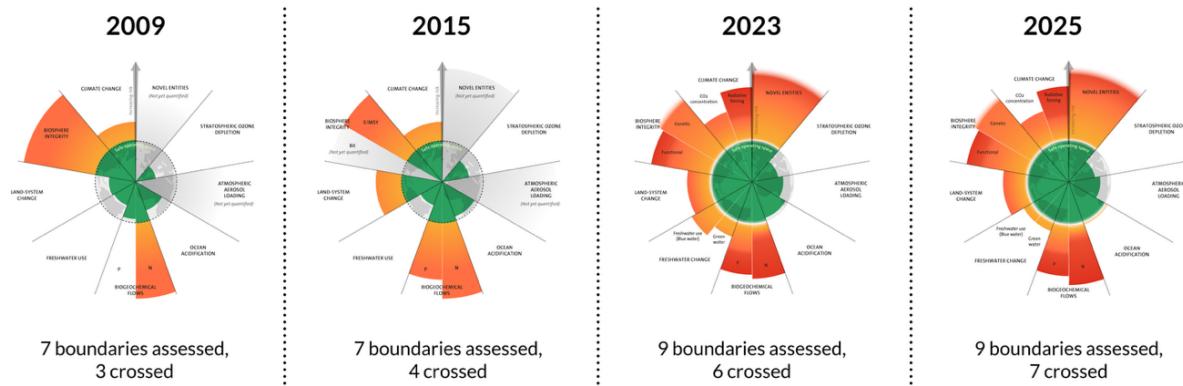
Fuente: <https://efitherma.com/es/cuales-serian-las-consecuencias-de-perder-la-capa-de-ozono/>

La existencia de nuestra civilización ha sido posible dentro de los límites funcionales de estos procesos planetarios que mantienen las condiciones de la biosfera propias del Holoceno. Sin embargo, las actividades humanas los están rebasando. La humanidad ha transgredido los límites seguros de funcionamiento de varios sistemas físicos, químicos y biológicos que mantienen las condiciones que permitieron nuestro desarrollo civilizatorio.

2.2 Los siete límites planetarios transgredidos

Los artículos publicados en 2009 por *Nature* (Rockström, J. *et al*, 2009a) y por *Ecology and Society* (Rockström, J. *et al*, 2009b) marcaron el lanzamiento del marco teórico sobre umbrales planetarios. En su primera aparición evaluaba siete umbrales e identificaba tres como ya transgredidos (Figura 29); en su última publicación (PBScience, 2025) ya evaluó los nueve umbrales e identificó siete transgredidos (Figura 19).

Figura 29. Evolución de las evaluaciones de umbrales planetarios.



Fuente: <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

Los siete umbrales planetarios ya transgredidos resultan de: la degradación de ecosistemas y la pérdida de biodiversidad; del exceso de carbono en la atmósfera (cambio climático y acidificación de los océanos); del exceso de nitrógeno y fósforo en ecosistemas; del exceso en la apropiación de recursos hídricos; del exceso del cambio de uso de suelos y su degradación; y de la contaminación global. Solamente los límites de dos de estos procesos no han sido transgredidos: la carga de aerosoles en la atmósfera y la destrucción de la capa de ozono.

2.2.1 Integridad de la biosfera

Límite transgredido. La Gran Aceleración ha provocado la sexta gran extinción de la biodiversidad en la historia de la Tierra⁴⁶. Actualmente se registran tasas de extinción entre centenas y miles de veces más altas que las ocurridas de manera natural durante los últimos 10 millones de años (Ceballos, H. *et al* 2015; Coule, R.H. *et al* 2022). La pérdida de diversidad genética debilita las capacidades de adaptación de las especies y, en general, las capacidades funcionales de la biosfera⁴⁷.

⁴⁶ <https://www.biodiversidad.gob.mx/biodiversidad/extinciones>

⁴⁷ Kleidon, A. (2023). Sustaining the Terrestrial Biosphere in the Anthropocene: A Thermodynamic Earth System Perspective. *Ecology, Economy and Society—the INSEE Journal*, 6(1), 53–80. <https://doi.org/10.37773/ees.v6i1.915> & <https://ecoinsee.org/journal/ojs/index.php/ees/article/view/915>

Figura 30. Las seis extinciones masivas en la historia de la Tierra.

Extinción	Hace millones de años	Causas	Familias marinas extintas	Géneros marinos extintos	Familias y especies terrestres
6ª Holoceno (<i>Antropoceno</i>)	0.010 a presente	<i>Homo sapiens</i>			
5ª Cretácico-Terciario	65	Cambio climático, vulcanismo, asteroide	16%	47%	18% familias de vertebrados (<i>dinosaurios</i>)
4ª Triásico (finales)	199 a 244	Vulcanismo, cambio climático	22%	52%	
3ª Pérmico-Triásico	251	Vulcanismo, cambio climático	53%	84%	70% especies terrestres
2ª Devónico (tardío)	364	Desconocidas	22	57	
1ª Ordovícico-Silúrico	439	Cambios en el nivel del mar	25	60	

Fuente: CONABIO <https://www.biodiversidad.gob.mx/biodiversidad/extinciones>

Además, gracias a la integridad genética de las especies y la integridad funcional de la biosfera se mantiene la capacidad regenerativa de los **servicios de los ecosistemas** (WRI, 2005), todos indispensables para nuestra existencia. Sean **de suministro** —alimentos, agua potable, aire oxigenado; **de regulación** —del clima, control de inundaciones y sequías, control de enfermedades zoonóticas; **de soporte** —formación y mantenimiento de suelos fértiles, ciclos de nutrientes, asentamientos humanos; o **culturales** —beneficios recreacionales, espirituales, religiosos, o científicos.

Figura 31. Relaciones entre los servicios de los ecosistemas y el bienestar humano.

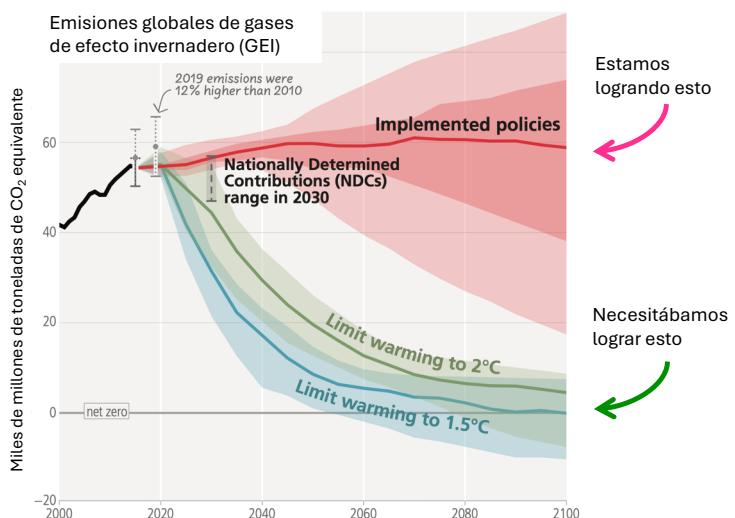


Fuente: WRI 2005; <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.3.aspx.pdf>

2.2.2 Cambio climático (ciclo biogeoquímico del carbono)

Límite transgredido. Debido al efecto invernadero de la atmósfera terrestre, el incremento en la concentración de CO₂ ha generado un desequilibrio en el balance térmico, porque se acumula más energía solar de la que normalmente se libera al espacio, con lo que se retiene más calor en la superficie terrestre. Las concentraciones de CO₂ en la atmósfera terrestre se mantuvieron por debajo de 280 ppm (partes por millón) durante cientos de miles de años, hasta el periodo preindustrial. Actualmente ascienden a 422.5 ppm⁴⁸; 50% más.

Figura 32. Ruta de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de acuerdo con las NDC, contrastada con las metas aspiracionales del Acuerdo de París.



Fuente: <https://unfccc.int/NDCREG> & <https://unfccc.int/es/node/650366>

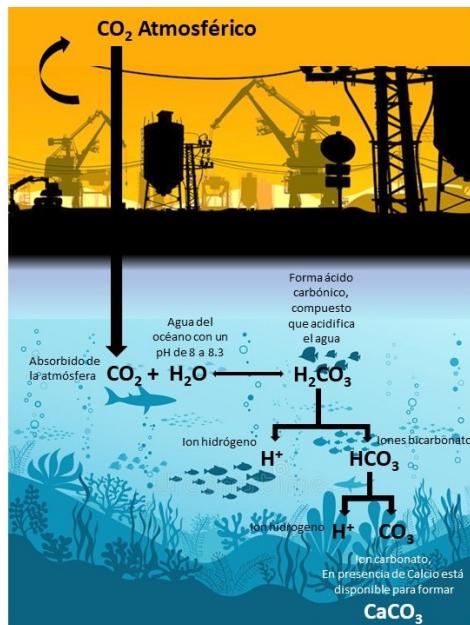
El Acuerdo de París⁴⁹ estableció limitar el calentamiento a un máximo de +1.5 Centígrados —lo que equivale a 350 ppm de CO₂— o, al menos, a +2°C, lo que debía lograrse con las contribuciones nacionalmente determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, la posibilidad de evitar +1.5°C ha sido rebasada y rápidamente nos aproximamos a superar +2°C —equivalentes a 450 ppm. Si, además, tomamos en cuenta los otros GEI —metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O)

⁴⁸ IEA, 2025. *Global Energy Review 2025*. IEA, FR. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions>

⁴⁹ <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>

principalmente—, las concentraciones ya rebasan las 500 ppm, lo que equivale a no menos de +3°C hacia fines de siglo XXI. Por consiguiente, los impactos adversos —grandes sequías, lluvias torrenciales, huracanes, inundaciones, deslaves, etc.—, se incrementarán mucho más en su frecuencia y su intensidad.

Figura 33. El exceso de CO₂ depositado en los océanos forma ácido carbónico, con los que el potencial de iones hidrógeno (H⁺) incrementa su concentración y captura más iones de carbonato (CO₃²⁻), disminuyendo su disponibilidad para los organismos marinos que lo requieren para construir sus exoesqueletos o conchas.⁵⁰



Fuente: <https://coralmar.org/acidificacion-de-oceanos/>

2.2.3 Acidificación de los océanos (ciclo biogeoquímico del carbono)

Límite transgredido. Del exceso de CO₂ en la atmósfera terrestre, alrededor de un tercio se deposita en los océanos —los sumideros de carbono más importantes del planeta. Esto incrementa la acidez de las aguas oceánicas, lo que disminuye la concentración de iones de carbonato de calcio (CaCO₃) disponibles para los organismos marinos que poseen conchas o exoesqueletos carbonatados. Así, disminuye la supervivencia y la capacidad de captura de carbono de estos organismos marinos, sus poblaciones se reducen y se afectan redes tróficas.

⁵⁰ <https://coralmar.org/acidificacion-de-oceanos/>

Al presente se ha perdido poco más de la quinta parte de las concentraciones marinas de CaCO_3 respecto del periodo preindustrial, transgrediendo los límites seguros de este proceso.

2.2.4 Ciclos biogeoquímicos del nitrógeno y del fósforo

Límite transgredido. La agricultura industrializada, destinada a alimentar a una población mundial que crece exponencialmente con la Gran Aceleración, agota los nutrientes naturales y los organismos de suelos anteriores a los fértilles. Entonces, para mantener y acrecentar la productividad se añaden, año tras año, inmensas cantidades de fertilizantes —formas reactivas de nitrógeno y fósforo.

Figura 34. El exceso de nitrógeno (N) y fósforo (P), por el uso intensivo de fertilizantes químicos, se dispersa en el ambiente, incrementa sus concentraciones en tierras y aguas y genera eutrofización en hábitats acuáticos, afectando redes tróficas y causando anoxia.



Fuente: <https://coralmar.org/descarga-de-aguas-residuales/>

Pero como las plantas cultivadas no capturan todo el nitrógeno y el fósforo de los fertilizantes aplicados, el sobrante se dispersa en tierras, aguas, costas y mares. Este exceso de nitrógeno y fósforo incrementa las concentraciones de nutrientes —eutrofización⁵¹— modificando sus ciclos biogeoquímicos naturales, produciendo explosiones poblacionales —como las mareas

⁵¹ <https://www.britannica.com/science/eutrophication>

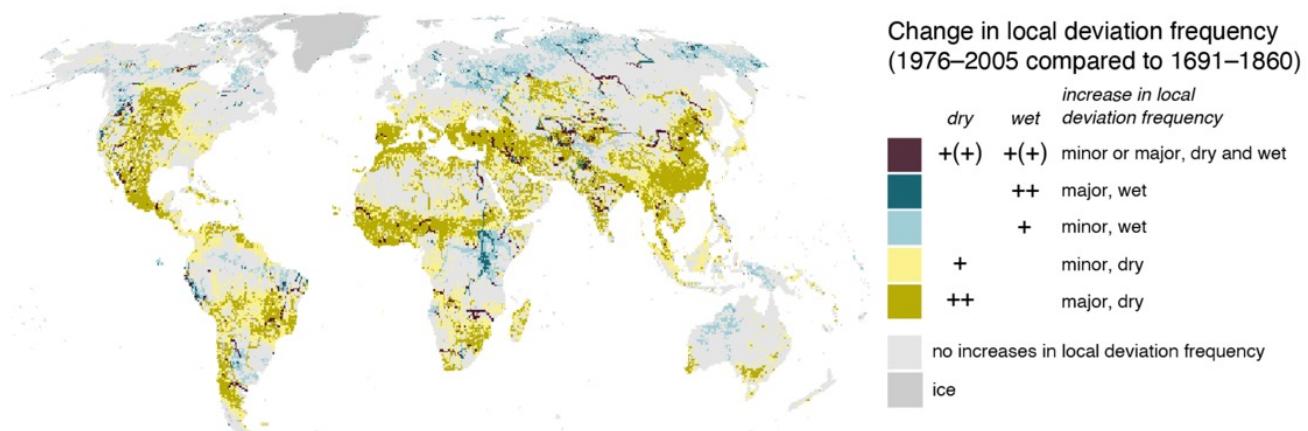
rojas—, generando un desequilibrio en las redes tróficas de ecosistemas acuáticos y costeros, y provocando anoxia —insuficiencia de oxígeno— para los organismos que habitan en esos ecosistemas.

En el caso del fósforo, el límite planetario es de 11 millones de toneladas por año, pero la agricultura industrial utiliza el doble. En el caso del nitrógeno, el límite natural es de 82 millones de toneladas al año, pero la agricultura industrial aplica más del doble.

2.2.5 Ciclo del agua

Límite transgredido. El ciclo del agua se ha modificado a gran escala por la construcción de grandes presas y desvíos en todos los grandes ríos del mundo, con la consecuente destrucción de hábitats de flora y fauna, que actuaban como esponjas almacenadoras y reguladoras. Esto ha causado la reducción del «agua verde» —la que requieren los ecosistemas— y ha reducido la disponibilidad y calidad del «agua azul» —para el consumo humano.

Figura 35. Desviaciones de caudales de agua en el mundo.
Gran parte de la zona terrestre del planeta ha sido intervenida.



Fuente: <https://eartharxiv.org/repository/view/3438/>

En el caso del «agua azul» se reconoce como límite no desviar caudales y ríos, o retenerlos mediante presas, más allá de 18% del área terrestre global, pero ya lo hacemos en 50%. En

el caso del «agua verde» el límite es de 16%, pero ya hemos modificado 50% del área terrestre global.

2.2.6 Integridad de los suelos

Límite transgredido. Por utilizar cada vez mayores superficies de tierras para uso agrícola y ganadero —además de para minería, grandes infraestructuras, parques industriales y ciudades—, *Homo sapiens* ha modificado el uso del suelo a escala planetaria. La deforestación, la fragmentación y destrucción de hábitats naturales y la desertización alcanzan niveles colosales.

Figura 36. El uso y cambio de uso de suelo por *Homo sapiens* afecta poco más de 60% de las tierras forestales del mundo.



Fuente: [https://www.reddit.com/r/pics/comments/1bik7l1/
an_orangutan_strolls_through_remains_of_a_former/](https://www.reddit.com/r/pics/comments/1bik7l1/an_orangutan_strolls_through_remains_of_a_former/)

Considerando como referencia la situación durante el periodo preindustrial, se estima que el límite máximo de ocupación, modificación o perturbación de tierras forestales no debiera exceder 54% de la superficie terrestre; sin embargo, actualmente ya ocupamos 60%.

2.2.7 Integridad ambiental (libre de contaminación)

Límite transgredido. La contaminación por nuevas entidades producidas por el ser humano, que no existen de manera natural, causa daños al medio ambiente y a los seres vivos porque altera y degrada procesos ecológicos y evolutivos. Sean de forma líquida, sólida o gaseosa, agroquímicos, residuos de la minería, industriales o urbanos, metales pesados, químicos tóxicos, inflamables o explosivos, disruptores endocrinos, contaminantes orgánicos, plásticos o microplásticos; sus efectos a largo plazo son difíciles de cuantificar, pero su acumulación afecta negativamente a la biodiversidad, a la salud humana y a muchos procesos naturales.

Figura 37. Residuos artificiales de todo tipo contaminan todos los rincones del planeta.



Fuente: https://encolombia.com/medio-ambiente/interes-a/residuos-solidos-urbanos/#google_vignette

El caso de insecticidas, herbicidas y fungicidas es bien conocido. Desde el DDT hasta el glifosato. Actualmente se utilizan más de mil diferentes plaguicidas en el mundo, acumulando poco más de 4.2 millones de toneladas por año⁵².

⁵² <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/pesticide-residues-in-food>

Figura 38. Agroquímicos, de los principales causantes de la pérdida de biodiversidad y malignos para la salud humana.



Fuente: <https://www.greenpeace.org/argentina/blog/problemas/contaminacion/un-acuífero-y-un-rio-contaminados-por-agroquímicos-la-tragedia-ambiental-ante-la-que-todos-miran-para-otro-lado/>

Figura 39. Microplásticos inundan los ecosistemas y los seres vivos del planeta.



Fuente: <https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/microplasticos-amenaza-para-la-salud>

Y ahora también los microplásticos se encuentran por doquier: tierra, mar, aire, en toda la cadena alimentaria e incluso en el cuerpo humano. En 2022 se descubrieron microplásticos en la sangre humana y, recientemente, se encontró evidencia en cerebros humanos⁵³.

⁵³ <https://es.weforum.org/stories/2024/09/microplasticos-estamos-enfrentando-una-nueva-crisis-de-salud-y-que-se-puede-hacer-al-respecto/>

El caso de los residuos plásticos que inundan el planeta (Figura 21) constituye una de las catástrofes ambientales globales más visibles⁵⁴. Más de 52 millones de toneladas se vierten al medio ambiente año tras año, de las cuales alrededor de 10 millones terminan en los océanos⁵⁵ —y la cifra crece. Ya hay una tonelada de plástico por cada tres toneladas de organismos marinos; a este ritmo, en 2050 habrá más plástico que peces.

2.3 Umrales planetarios no transgredidos

2.3.1 Aerosoles en la atmósfera

Umbral no transgredido. Además de gases, la atmósfera contiene una diversidad de micropartículas suspendidas: los aerosoles (Figura 27). Durante el periodo preindustrial estos eran solamente polvos finos provenientes de desiertos, de vegetales (polen, esporas), de incendios forestales o de erupciones volcánicas. En el presente provienen de una multiplicidad de fuentes artificiales y muy diversa composición química: como chimeneas (hollín o carbón negro), quema de combustibles fósiles (escapes de vehículos de combustión interna, termoeléctricas) y polvos de procesos industriales.

El incremento en la carga de aerosoles en la atmósfera induce modificaciones físicas, biogeoquímicas y biológicas en el Sistema Tierra. Algunos son precursores de gases de efecto invernadero o destructores de la capa de ozono. La carga de aerosoles ya se duplicó respecto del periodo preindustrial, y actualmente nos encontramos en las proximidades del umbral para el espacio planetario seguro (Figura 19).

⁵⁴ <https://www.unep.org/es/contaminacion-por-plasticos>

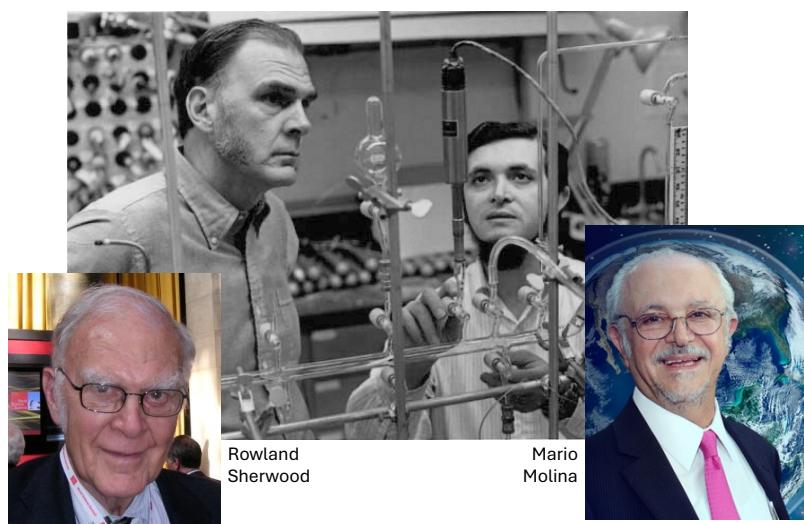
⁵⁵ <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20181005STO15110/plasticos-en-el-oceano-datos-efectos-y-nuevas-normas-europeas-infografia>

2.3.2 Capa de ozono

Umbral no transgredido. La capa de ozono (O_3) constituye el escudo planetario del que disponemos los seres vivos para protegernos de la luz ultravioleta proveniente del sol, que modifica o degrada moléculas orgánicas, por lo que provoca mutaciones o inviabilidad reproductiva, así como cáncer de piel en seres humanos (Figura 28).

La contaminación atmosférica por clofluorocarbonos —químicos utilizados como refrigerantes en procesos industriales y en transformadores de redes de distribución eléctrica— destruye la capa de ozono, adelgazándola o produciendo agujeros.

Figura 40. Mario Molina, científico mexicano y Rowland Sherwood, científico norteamericano, descubridores del proceso destructor de la capa de ozono, Premio Nobel de Química 1995.



Fuente: <https://especificarmag.com.mx/el-legado-de-molina-y-rowland/>

Que estos gases refrigerantes destruían la capa de ozono estratosférico lo descubrieron y publicaron, en 1974, el científico mexicano Mario Molina Pasquel y su colega americano Frank Sherwood Rowland —por lo que obtuvieron el Premio Nobel de Química 1995.

Este descubrimiento dio lugar al Protocolo de Montreal⁵⁶, gracias al cual ha sido posible minimizar el uso de estos gases, frenar la destrucción de la capa de ozono e iniciar su recuperación. Excelente ejemplo de cuando los conocimientos científicos sí logran influir en los tomadores de decisiones, a fin de adecuar las políticas públicas y construir acuerdos internacionales multilaterales para corregir algo que se estaba haciendo mal.

⁵⁶ Negociado en 1987 y entrado en vigor el 1º de enero 1989. <https://ozone.unep.org/es>

3. Termodinámica del proceso económico

3.1 Termodinámica

La termodinámica es la rama de la física que estudia las relaciones entre el calor, el trabajo, la temperatura y la energía. Estudia cómo la energía se transforma y cómo rige los procesos naturales y las actividades humanas, la tecnología, el comportamiento de las estrellas o de los motores y de las reacciones químicas. La ley de conservación de la energía y de la materia y la ley de la entropía rigen el comportamiento del universo. Leyes físicas que establecen que la energía total y la materia total del universo se mantienen constantes, pero que la entropía —el desorden, o dissipación de la energía y de la materia— se incrementa indefinidamente, porque los procesos de transformación de energía o materia son irreversibles. Conclusión: el universo se dirige hacia el desorden, al caos y, finalmente —en un tan distante futuro que nunca veremos— a la muerte térmica⁵⁷.

Las leyes de la termodinámica son clave para la ecología en la comprensión de flujos de energía y materiales a través de las redes tróficas entre los seres vivos, entre los sistemas ecológicos y de la biosfera en su conjunto (Figuras 1 y 2). Asimismo, la termodinámica es fundamental para las ingenierías en el aprovechamiento de fuentes de energía y su transformación en formas utilizables para la producción de bienes y servicios.

En particular, la termodinámica permite comprender la diferencia entre procesos reversibles e irreversibles (la flecha del tiempo); de lo cual la teoría económica no parece haberse dado por enterada.

⁵⁷ Se entiende que el sol, nuestra estrella amarilla, se encuentra a la mitad de su vida y, dentro de 5 mil millones de años pasará a ser gigante roja antes de colapsar. La predicción de la termodinámica sobre la muerte térmica del universo es mucho más lejana en el tiempo, incommensurable.

3.1.1 Trabajo y energía

Como decía Marx (1979)⁵⁸, la fuente de toda riqueza no es solamente el trabajo, sino también los recursos que la naturaleza ofrece al ser humano⁵⁹. De hecho el trabajo es, en sí mismo, una fuerza de la naturaleza, la fuerza humana de trabajo.

El trabajo es esencial de la naturaleza humana, porque produce los bienes para la supervivencia, la reproducción y el bienestar. Para realizarlo es indispensable tener energía. ¿De dónde proviene esta energía? De la alimentación, la cual a su vez proviene —directa (plantas) o indirectamente (animales)— de la fotosíntesis. Ejemplo clásico para explicar cómo se transforma la energía, a partir de una fuente —el sol—, en otra fuente de energía —biomasa alimentaria— que, por digestión y metabolismo, se transforma en energía química corporal que nos mantiene vivos y activos para poder generar un producto: un producto del trabajo.

¿Qué es, entonces, la energía? En términos generales la energía es la capacidad de producir movimiento, un cambio; en general: la capacidad de un sistema de realizar un trabajo⁶⁰; por ejemplo, levantar un objeto o transmitir calor. Se trata de una de las nociones más elementales de la física. Es un concepto abstracto, porque la energía no se ve, sólo sus efectos pueden observarse: movimiento, calor, luz. Desde el punto de vista de la física, la energía se manifiesta de diversas formas:⁶¹

- energía cinética (del movimiento)
 - mecánica, la de objetos en movimiento (automóviles, viento, ríos, mareas);
 - térmica, calorífica (grado de agitación de átomos o moléculas de una sustancia, mayor a mayor temperatura);
 - radiante, transportada por ondas electromagnéticas (luz solar, rayos X, ondas de radio);

⁵⁸ <https://www.marxists.org/espanol/m-e/1870s/gotha/critica-al-programa-de-gotha.htm>

⁵⁹ Lo que Nicholas Georgescu-Roegen denomina la «dote» de bienes terrenales que recibe el ser humano de la naturaleza (ver más adelante).

⁶⁰ <https://www.vedantu.com/physics/relation-between-work-and-energy>

⁶¹ <https://www.eia.gov/energyexplained/what-is-energy/forms-of-energy.php>

- eléctrica, cuando los electrones fluyen a través de conductores (corriente eléctrica, medida en Amperes, una vez prendido un interruptor).
- energía potencial (la almacenada)
 - gravitatoria, debido a la posición de un objeto (aguas retenidas en una presa);
 - química, almacenada en los enlaces moleculares de las sustancias (que se libera en reacciones químicas como la combustión, la digestión de alimentos, o el uso de una batería eléctrica);
 - nuclear, la almacenada en el núcleo de los átomos (fuente de la energía de las estrellas, o de las centrales nucleares);
 - eléctrica, cuando almacenada en una batería, o en tensión (medida en Volts, antes de prender un interruptor).

Por ejemplo, entre más rápidamente se desplace un objeto y/o entre más pesado sea, mayor será su energía cinética. En física clásica, la energía cinética (E_c) es una función de la masa (m) y de la velocidad (v):

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad 3$$

Como se observa en la ecuación 3, en la energía cinética la velocidad influye más que la masa. Por eso un choque entre automóviles es mucho más fuerte a mayor velocidad que a mayor peso de ellos.

Recordando que en física clásica: la velocidad (v) se mide como distancia (d) entre tiempo (t); la aceleración (a) se mide como velocidad entre tiempo (v/t); y la fuerza (F) como masa veces aceleración ($m \times a$); la manera de medir el trabajo (w) es:

$$w = F \times d \quad 4$$

Donde d se mide en metros (m); t en segundos (s); F en Newtons (N); w se mide en Joules (J); y m en kilogramos (kg).⁶²

⁶² Un Newton es la fuerza capaz de acelerar un objeto de masa 1 kilogramo, incrementando cada segundo su velocidad de un metro por segundo ($1\text{kg} \times 1\text{m/s/s}$); en tanto que un Joule es la cantidad de trabajo realizado cuando una fuerza de 1 Newton desplaza un objeto a un metro de distancia ($1\text{kg} \times 1\text{m/s}^2 \times 1\text{m}$).

Si la energía (E) es la capacidad de realizar un trabajo (w), éste es la capacidad de realizar una transferencia de energía. La energía es una atribución del *estado* de un sistema, en tanto que el trabajo es una atribución del *proceso* de transferencia de energía que realiza un sistema. Tanto el trabajo como la energía se miden en Joules.

3.1.2 Tipos de sistemas

Un sistema es una porción del universo que interesa distinguir o estudiar. Los sistemas termodinámicos pueden ser abiertos, cerrados o aislados⁶³. Un sistema abierto es aquel que intercambia masa y energía (generalmente en forma de calor) con sus alrededores; un sistema cerrado solamente intercambia energía, pero no masa; y un sistema aislado no intercambia ni masa ni energía.

Por eso, desde el punto de vista termodinámico, los ecosistemas y los seres vivos somos sistemas abiertos, porque continuamente intercambiamos masa y energía con nuestro entorno (respirar, beber, comer, transpirar, evacuar). Tanto como el sistema económico (flujo de materiales y energía)—aunque los economistas lo traten como si fuera un sistema aislado. El Sistema Tierra puede ser considerado un sistema cerrado, pues recibe enormes cantidades de energía solar e irradia calor hacia el espacio, pero prácticamente no intercambia materia (meteoritos de masa insignificante para la masa de la Tierra y pérdida a cuentagotas de hidrógeno que escapa de las más altas capas de la atmósfera). Estrictamente, sólo el universo es un sistema aislado porque, al carecer de entorno, no intercambia ni materia ni energía.

3.1.3 Energía interna y energía térmica

La energía interna U de un sistema corresponde a la energía cinética y la energía potencial acumulada de todos los átomos o moléculas que lo constituyen; lo cual depende de la naturaleza química y física de sus átomos y moléculas, de su temperatura y, bajo ciertas condiciones, de la presión y el volumen. No es posible cuantificar el valor absoluto de U ,

⁶³ <https://surfguppy.com/thermodynamics/thermodynamic-system-open-closed-isolated-systems/>
https://en.wikipedia.org/wiki/Thermodynamic_system

pero lo que interesa en termodinámica es el cambio de energía interna ΔU entre la energía inicial U_i y la energía final U_f . En particular, la termodinámica se interesa en la energía térmica E y cuando se produce un calentamiento o un enfriamiento del sistema. Es decir, un cambio de **energía térmica** $\Delta E = E_f - E_i$, que se mide por el cambio de temperatura y que corresponde —a diferencia de U — solamente a la energía cinética acumulada del movimiento de todos sus átomos o moléculas (Crockford H.D. & Knight S.B. 1968). Por ejemplo, a igual temperatura el océano contiene mucho más energía térmica que un vaso de té, porque contiene muchas más moléculas. Así, la energía térmica E se genera cuando se incrementa la energía cinética interna de un sistema, como es el caso de la energía solar al impactar la superficie terrestre; o por fricción, por fisión nuclear, o por combustión.

A partir de la domesticación del fuego, manipulamos la energía térmica exosomática⁶⁴ desde hace cientos de miles años. Y actualmente la utilizamos en muchísimas actividades productivas para: generar electricidad, muy diversos procesos industriales, motores de combustión interna, altos hornos, calefacción y refrigeración, cocinar.

La transferencia de energía térmica, de un sistema a otro, se denomina **calor** y se cuantifica midiendo las temperaturas de ambos sistemas. Transferencia que sucede en un solo sentido: del sistema más caliente hacia el más frío, del de mayor temperatura hacia el de menor temperatura, independientemente de su tamaño. Para medir la transferencia de calor se utiliza el calor específico (c), que indica la energía térmica necesaria para elevar 1°C la temperatura de 1g de una sustancia dada. De tal modo que, en general, la cantidad de energía térmica q requerida para elevar la temperatura de un sistema dependerá de la diferencia de temperaturas inicial y final $T_f - T_i = \Delta T$ y de su masa m :

$$q = mc\Delta T$$

5

⁶⁴ Por oposición a nuestros órganos biológicos, que se modifican por selección natural, los artefactos creados por el ser humano son «órganos» exosomáticos que amplifican nuestras capacidades biológicas. Por ejemplo, estufas para cocinar, aviones para volar, automóviles para desplazarnos a gran velocidad, equipos de buceo para respirar bajo el agua; y, en general, todas las herramientas, máquinas e infraestructuras.

Donde q se mide en Joules (J) o en calorías (cal⁶⁵), m en kg y T en Centígrados o grados Kelvin.

3.1.4 Fuentes de energía

Existen dos tipos de fuentes de energía:

- **de flujo** —renovables: el sol, el viento, hidráulica, geotérmica (a escala humana) y biomasa.
- **de stock** —no renovables: combustibles fósiles, geotérmica (a escala geológica) y nuclear.

También se distinguen según su disponibilidad directa o indirecta. Las fuentes **primarias** de energía se encuentran en estado natural: solar, eólica, geotérmica, petróleo crudo o minerales de uranio. Las fuentes **secundarias** de energía han sido convertidas a partir de las primarias: electricidad, gasolinas, o hidrógeno.

Y en términos biológicos puede distinguirse entre energía **endosomática** —la energía química corporal que utilizamos por sobrevivir y trabajar— y energía **exosomática** —la que nos ofrecen los recursos naturales (biomasa alimentaria, biomasa combustible, combustibles fósiles, hidráulica, geotérmica, nuclear).

3.1.5 Combustibles fósiles: un subsidio ecológico

Es muy importante comprender que, desde el punto de vista de la teoría ecológica, los combustibles fósiles constituyen un subsidio ecológico que ha hecho posible la Gran Aceleración (Figura 10); el crecimiento exponencial de la industrialización (evolución humana exosomática) y de la población (biomasa humana, Figura 5; número de individuos, Figuras 6 y 7). Fósiles porque provienen de biomasa de hace millones de años. El carbón fósil se formó durante el periodo Carbonífero, hace 360 a 300 millones de años, cuando la Tierra estaba cubierta de vastos bosques pantanosos llenos de helechos gigantes y musgos,

⁶⁵ Una caloría es la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de 1 gramo de agua 1 Centígrado.

de los cuales proviene el carbón. El petróleo y el gas se formaron durante la Era Mesozoica, hace 252 a 66 millones de años y provienen fundamentalmente del plancton de entonces.

Por eso **los combustibles fósiles constituyen un subsidio ecológico** (Odum, H.T. 1971), porque son biomasa —fossilizada— proveniente de fotosíntesis del pasado remoto. Dicho de otro modo, energía de flujo (solar) del pasado que, por procesos geológicos, quedó almacenada como energía de stock (química), que utilizamos como fuente de energía primaria adicional a la solar, con base en la cual ha sido posible una civilización industrial de crecimiento exponencial y que la población global de *Homo sapiens* creciera mucho más de lo que permite la capacidad de carga de la biosfera (Figura 5).

La cuestión estratégica de largo plazo es cómo sustituir las colosales cantidades de energía primaria disponible de los combustibles fósiles que requiere nuestra civilización industrial, con fuentes alternativas de energía. Nada indica que esto sea posible (Smil, V., 2022).

3.1.6 Leyes de la termodinámica

La termodinámica tiene cuatro leyes (Crockford H.D. & Knight S.B. 1968). No todas establecidas de una sola vez, ni en el orden que hoy las conocemos, pues son el resultado de un proceso de varias décadas, involucrando a numerosos investigadores que buscaban comprender la naturaleza del calor y de la eficiencia de las máquinas de vapor. Por lo que, en general, la termodinámica estudia sistemas cerrados —que intercambian solamente energía con su entorno, pero no materia. Típicamente estudia sistemas de un cilindro que contienen un gas, con un pistón que permite incrementar o reducir la presión (P), el volumen (V) o la temperatura (T) del gas, de tal manera que si la energía interna (E) se mantienen constante, la energía recibida o transferida hacia el exterior es equivalente al trabajo (w) realizado por, o sobre, el sistema:

$$E = w$$

Antes de que la termodinámica definiera el calor como el movimiento de los átomos (teoría cinética), los científicos intentaban averiguar por qué el calor se desplazaba de los cuerpos calientes a los fríos. Durante el siglo XVIII Antoine Lavoisier⁶⁶ —reconocido como padre de la química moderna que estableció la **ley de la conservación de la masa**—, desarrolló una teoría para explicarlo; errónea en su consideración de que el calor era una sustancia, un fluido, pero que sentó las bases matemáticas que más tarde utilizaría Sadi Carnot (ver más abajo), para postular la segunda ley de la termodinámica.

La **primera ley** de la termodinámica se estableció durante las décadas de 1840 y 1850, con las contribuciones de Julius Robert von Mayer, James Prescott Joule y Hermann von Helmholtz, entre otros, quienes cuestionaban la idea dominante de la época y demostraron que el calor no era una sustancia, sino una forma de energía. El experimento más conocido para demostrarlo es el de Joule, al hacer caer un peso para hacer girar una paleta en el agua, demostrando que el trabajo mecánico elevaba la temperatura del agua; con lo cual estableció el equivalente mecánico del calor, es decir, que cierta cantidad de trabajo puede producir una cierta cantidad de calor.

Así, la **ley de la conservación de la energía** establece que **la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma**. Por consiguiente, la energía total de un sistema aislado, el universo, es constante. Para efectos teóricos y experimentales, la energía se distingue entre la del sistema y la de sus alrededores:

$$E_{univ} = E_{sist} + E_{alr} \Leftrightarrow \Delta E_{univ} = 0$$

7

En síntesis, el primer principio reconoce la conservación de la energía, que no se crea, ni se pierde, sólo se transforma, de una a otra forma de energía. De tal modo, la primera ley explica que el cambio de energía interna ΔE de un sistema puede expresarse como la suma de la cantidad de calor (q) transferido más el trabajo (w) realizado:

⁶⁶ <https://www.britannica.com/biography/Antoine-Lavoisier>

$$\Delta E = q + w$$

8

Este cambio de energía interna puede realizarse a temperatura (T), o volumen (V), o presión (P) constantes, dependiendo del sistema⁶⁷. En termodinámica, el tipo de trabajo más común es a presión constante y volumen variable, que sucede cuando un sistema (un gas) se expande o se comprime. Trabajo (w) que se expresa como:

$$w = -P\Delta V = -P(V_f - V_i) \quad 9$$

Así, si el sistema se expande (ΔV es positivo), se realiza trabajo hacia el entorno y w es negativo, pues el sistema pierde energía; en cambio, si el sistema se comprime (ΔV es negativo), se realiza trabajo hacia el sistema y w es positivo, pues el sistema gana energía. Por ejemplo, en el caso de un sistema en el que el gas se expande a presión constante — como una máquina de vapor —, la ecuación 8 se expresa:

$$\Delta E = q_P - P\Delta V \quad 10$$

Donde q_P es la cantidad de calor transferido a presión constante y el trabajo es la expansión del gas: $w = \Delta V = V_f - V_i$.

La **segunda ley** la esbozó Sadi Carnot en 1824. Carnot se interesaba en la eficiencia de las máquinas de vapor y quería saber cuál era el rendimiento teórico máximo de un motor. Su obra *Réflexions sur la puissance motrice du feu*⁶⁸ permitió comprender: (1) que para que un motor produzca trabajo se requiere un flujo de calor a partir de una fuente caliente (q_1 , la

⁶⁷ Es convención generalizada el uso de mayúsculas para las cantidades termodinámicas que son funciones de estado (E , T , V , P y S); en tanto que se utilizan minúsculas para los parámetros de transferencia de energía (q y w).

⁶⁸ <https://www.france-memoire.fr/dossiers/reflexion-sur-la-puissance-motrice-du-feu-de-sadi-carnot/>

caldera), hacia un fuente fría (q_2 , el condensador); y (2) que es imposible convertir todo el calor en trabajo, pues una fracción se pierde inevitablemente hacia la fuente fría y el entorno:

$$w = q_1 - q_2 \quad \text{donde} \quad q_2 > 0 \quad 11$$

Es decir, mientras que el proceso mecánico del sistema es reversible: el pistón que se levanta, al caer restablece el estado inicial del sistema; el proceso termodinámico es irreversible: porque $q_2 > 0$ y el pistón solamente puede elevarse nuevamente si se suministra energía desde el exterior.

Esta idea fue formalizada a mediados del siglo XIX por Rudolf Clausius y Lord Kelvin con la noción de **entropía**, para describir la **irreversibilidad del proceso de conversión de calor en trabajo**; conversión en la cual la transferencia de energía térmica siempre va desde lo caliente hacia lo frío e imposible en sentido contrario. Según la definición de Clausius, si una cantidad de calor q fluye hacia un gran depósito de calor a una temperatura T , entonces el aumento de entropía S es:

$$\Delta S = q/T \quad 12$$

Para demostrar el **principio de irreversibilidad** se consideran dos depósitos de calor R_1 y R_2 a temperaturas T_1 y T_2 (por ejemplo, una plancha y un bloque de hielo). Si una cantidad de calor q fluye de R_1 , la plancha, hacia R_2 , el bloque de hielo, el cambio neto de entropía para los dos depósitos es:

$$\Delta S = q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad 13$$

Cambio positivo porque $T_1 > T_2$. Es decir, el hecho que el calor nunca fluya espontáneamente de frío a caliente es equivalente a requerir que el cambio neto de entropía sea positivo para un flujo de calor. Cuando $T_1 = T_2$ los depósitos alcanzan equilibrio térmico, no existe más flujo de calor y $\Delta S = 0$.

En general, la irreversibilidad es el sentido único de las transformaciones espontáneas, siempre desde estados menos desordenados (baja entropía) hacia estados más desordenados (alta entropía), imposible en sentido contrario. Por ello, la **segunda ley** de la termodinámica, **la entropía**, es una medida del grado de desorden, aleatoriedad o incertidumbre de un sistema: **cuanto más desordenado está un sistema, mayor es su entropía**. Y la entropía de un sistema aislado (el universo) se incrementa a través del tiempo, nunca se reduce.

El establecimiento de la entropía y la segunda ley de la termodinámica constituye un evento decisivo de la aventura humana. El mismo Albert Einstein se refirió a ellas como las únicas ideas sobre el funcionamiento del universo que nunca serían refutadas.⁶⁹

La **tercera ley** fue establecida por Walther Nernst, en 1906, quien, al estudiar algunas reacciones químicas a muy bajas temperaturas observó que la entropía de los sistemas tendía hacia un valor mínimo, constante, conforme se aproximaba al cero absoluto (-273.15°C). Esto condujo al postulado teórico de que **la entropía de un cristal perfecto es cero**, es decir, que en tal estado un sistema —por extrapolación— se encuentra en un orden perfecto (aunque en la práctica sea imposible alcanzar el cero absoluto).

Y la **cuarta ley**, o **principio cero**, fue la última en formalizarse, en 1931, por Ralph H. Fowler: si un cuerpo A está en equilibrio térmico con un cuerpo C y si otro cuerpo B está en equilibrio térmico con el mismo cuerpo C, entonces A y B también se encuentran en equilibrio térmico entre sí. Parece trivial, pero este principio **fundamenta el uso de los termómetros**, al reconocer que la temperatura es medible y transmisible. Fue el último principio en establecerse, pero se le denominó principio cero por considerarlo más fundamental que los otros.

Finalmente, un concepto fundamental es el de **equilibrio termodinámico**, estado de reposo completo de un sistema cuando no hay más flujos de energía o materia al interior del sistema

⁶⁹ <https://www.britannica.com/science/entropy-physics>

o con sus alrededores. Deben cumplirse, simultáneamente, tres condiciones: equilibrio térmico (temperatura uniforme, no hay transferencia de calor de una parte a otra del sistema); equilibrio mecánico (presión uniforme, fuerzas mecánicas en equilibrio); y, equilibrio fisicoquímico (la composición material del sistema es estable, no hay reacciones químicas netas, no hay difusión de materia). Como corolario, para un sistema aislado el equilibrio termodinámico corresponde al estado de máxima entropía.

3.2 El proceso económico

3.2.1 Administrar la escasez

Abordando en el presente ensayo las apremiantes cuestiones que derivan de los límites planetarios para el crecimiento resulta irónico que la teoría económica se base sobre la escasez como concepto central. Que parte del reconocimiento de que mientras nuestras necesidades y deseos son ilimitados, los recursos para satisfacerlos son limitados.

Así, el objeto de estudio de la economía es cómo los individuos, las empresas y los gobiernos toman decisiones para asignar estos recursos escasos con el fin de satisfacer mejor sus necesidades. Y como no es posible tener todo lo que se desea, cada elección implica un sacrificio (adquirir el producto *x*, en lugar del *y*). De donde proviene el concepto de costo de oportunidad: el valor de la mejor alternativa a la que se renuncia cuando se hace una elección.

3.2.2 Teorías económicas

Antes de exponer cómo la dimensión termodinámica rige el proceso económico (siguiente sección), hay que señalar que esta crítica ha sido dirigida fundamentalmente a la corriente dominante en teoría económica, la neoclásica, que asume como perfectos la racionalidad del *Homo economicus*, el equilibrio de mercados y la información. Otras teorías económicas⁷⁰ han desarrollado críticas, desde diversos enfoques, a la teoría neoclásica, buscando describir de manera alternativa el proceso económico.

⁷⁰ <https://www.britannica.com/topic/economic-theory>

Quizás la más relevante sea la keynesiana⁷¹, que rechaza la idea de que los mercados se equilibren automáticamente y permitan regresar al pleno empleo; por lo que plantea que los gobiernos deben intervenir en los mercados mediante la política fiscal y no dejarlos a «la mano invisible».

La más profunda quizás sea la teoría marxista⁷², que critica a la neoclásica por ignorar el conflicto de clases y la explotación de la fuerza de trabajo, ya que de ésta proviene el valor, no de una utilidad subjetiva. Explica el proceso económico por la dinámica de las relaciones de poder entre el capital y el trabajo, en lugar de un supuesto intercambio mutuamente beneficioso.

La economía conductual⁷³, crítica psicológica que rechaza la suposición de la racionalidad perfecta, porque los seres humanos reales no son robots calculadores, sino individuos con emociones y preferencias, que no siempre toman las mejores decisiones para su interés económico.

La economía institucional critica a la neoclásica por considerar el mercado como una abstracción matemática que existe en el vacío. Explica cómo los derechos de propiedad, las regulaciones y las estructuras de gobernanza afectan la gestión medioambiental. Uno de sus principales representantes, Elinor Ostrom (1990), demuestra que a cierta escala de población y territorio la gestión de recursos naturales funciona bajo formas de propiedad colectiva. Es decir, reconoce el problema de la «tragedia de los comunes» (Hardin, G. 1968) como una falla institucional a escala de países o regiones.

Y por supuesto, la economía ecológica, desarrollada principalmente por Robert Costanza⁷⁴ y Herman Daly⁷⁵, discípulos de Nicholas Georgescu-Roegen, así como el ecólogo Howard

⁷¹ <https://www.britannica.com/money/John-Maynard-Keynes>

⁷² <https://www.britannica.com/biography/Karl-Marx>

⁷³ <https://www.britannica.com/topic/behavioral-economics>

⁷⁴ <https://www.robertcostanza.com>

⁷⁵ <https://steadystate.org/herman-daly/>

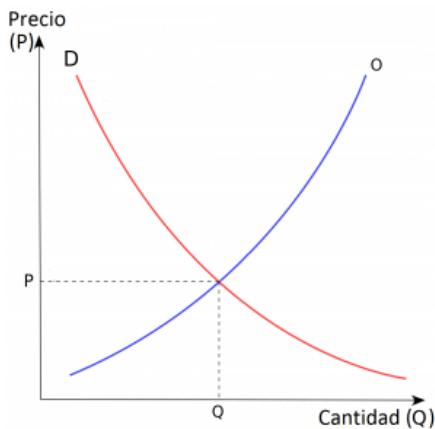
T. Odum⁷⁶ y el economista Joan Martínez Alier⁷⁷. En 1989 se fundó la Sociedad Internacional de Economía Ecológica⁷⁸. Su crítica central es que la economía es un subsistema de la biosfera, por lo que el crecimiento infinito es imposible. Actualmente, la mayor parte de sus promotores realizan economía ambiental y economía política, muy pocos realizan realmente investigación ecológica de la economía, es decir, estudios sobre el flujo de energía y materiales en la economía, sobre el metabolismo socio-industrial.

En lo que sigue se presenta una descripción de la teoría económica neoclásica, para dar lugar, después, a la crítica de Nicholas Georgescu-Roegen: entropía y proceso económico.

3.2.3 Microeconomía

La microeconomía estudia las decisiones de los actores individuales —hogares y empresas— y sus interacciones en los mercados. Utiliza el modelo de oferta y demanda para determinar cómo se establecen los precios y la cantidad de bienes y servicios, que pueden encontrar un punto de equilibrio cuando la demanda y la oferta coinciden y el precio de mercado se estabiliza. De donde se supone una capacidad reguladora de los mercados.

Figura 41. Diagrama del modelo de la oferta y la demanda.



Fuente: https://www.socioeco.org/bdf_auteur-1737_fr.html

⁷⁶ <https://www.emergysociety.com/howard-t-odum/>

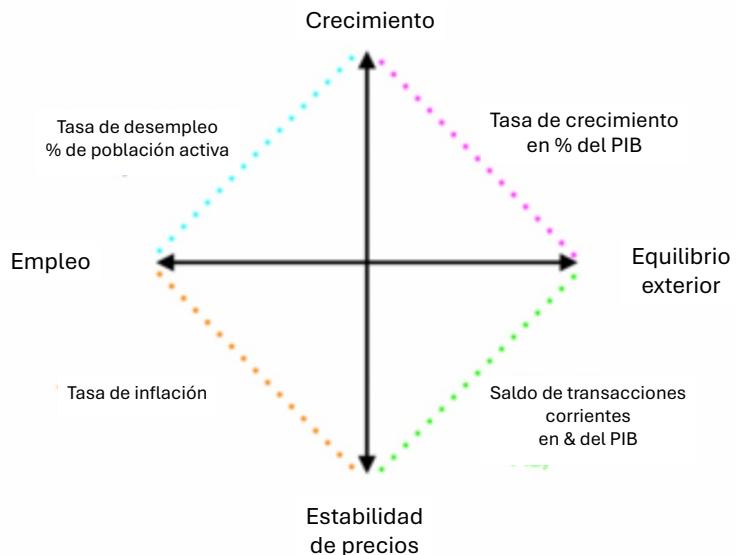
⁷⁷ https://www.socioeco.org/bdf_auteur-1737_fr.html

⁷⁸ International Society of Ecological Economics: <https://www.isecoeco.org>

3.2.4 Macroeconomía

Por su parte, la macroeconomía estudia la economía en su conjunto, a escala de país o región, considerando tres indicadores claves: el producto interno bruto (PIB), valor total de todos los bienes y servicios finales producidos durante un periodo dado; la inflación; y el desempleo. Asimismo, analiza las decisiones de política presupuestaria de los gobiernos y de política monetaria de los bancos centrales en su intención por lograr un crecimiento estable, control de la inflación y bajas tasas de desempleo.

Figura 42. Diagrama del «cuadrado mágico» de Kaldor.



Fuente: Con base en Piaser, G. 2024.

Bajo el supuesto de que el objetivo central de la macroeconomía es el de asegurar la prosperidad económica de un país o región, analiza las cuatro grandes variables de la macroeconomía keynesiana: crecimiento, empleo, precios y comercio exterior. Para lo cual utiliza el concepto del «cuadrado mágico»; calificado de mágico porque en la realidad es prácticamente imposible alcanzar simultáneamente los cuatro objetivos (Figura 42); lo que generalmente sucede es un conflicto entre ellos. Por ejemplo, un fuerte crecimiento sobrecalienta la economía y genera inflación, obligando a que las autoridades políticas arbitren entre uno y otro.

La macroeconomía mantiene el objetivo del crecimiento porque supone que es la única manera de crear riqueza y, así, crear empleos, mejorar el nivel de vida de los habitantes y generar ingresos fiscales para el Estado —a fin de financiar los servicios públicos a los que está obligado (salud, educación, etc.). El objetivo del pleno empleo es esencial para que todos los ciudadanos tengan ingresos, así como evitar la pobreza y los problemas sociales que de ella derivan. El objetivo de la estabilidad de precios es necesario para controlar la inflación, con lo que se evita que el poder de compra se erosione o que se desincentive la inversión. Y el objetivo de equilibrio del comercio exterior se requiere para evitar déficits comerciales estructurales que incrementen la deuda externa.

Pero como se mencionó más arriba, en la práctica es irrealizable alcanzar los cuatro objetivos simultáneamente. Porque, por ejemplo, si para reducir el desempleo el gobierno incrementa el gasto público, con ello puede aumentar la inflación, así como la deuda pública para las generaciones futuras. O bien, aunque un crecimiento económico fuerte incita a incrementar el consumo, ello puede generar un aumento de las importaciones y desequilibrar la balanza del comercio exterior.

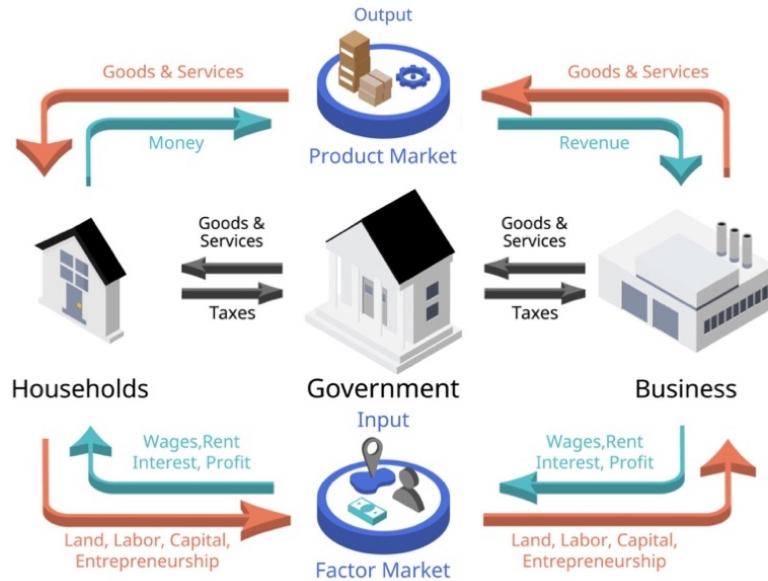
Por añadidura, hoy día se ha vuelto de actualidad un quinto objetivo: la sostenibilidad ambiental, que actualmente se aborda bajo el enfoque del «crecimiento verde», un crecimiento que respete la integridad ambiental, que desacople el crecimiento de la contaminación y el agotamiento de recursos naturales y que administre la transición climática y la transición energética.

3.2.5 El modelo de flujo circular

El proceso económico se describe conteniendo tres actividades básicas: producción, distribución y consumo. La producción es la parte del proceso que crea los bienes y servicios; e involucra la combinación de los factores de la producción (trabajo, tierra, capital y

capacidad emprendedora). La distribución es la forma en que los bienes y servicios producidos se dividen y entregan a diferentes personas o empresas. Y el consumo, objetivo último de toda actividad económica, es la etapa en la que las personas o grupos utilizan los bienes y servicios para satisfacer sus necesidades y deseos.

Figura 43. Modelo de Flujo Circular, concepto fundacional de la teoría económica.



Fuente: <https://kids.britannica.com/students/article/economics/274118/media?assemblyId=167503>

La manera típica de describir el proceso económico es mediante el modelo de flujo circular, concepto fundacional de la teoría económica, especialmente en macroeconomía. Este modelo muestra que una economía industrial moderna consiste en un flujo circular de bienes, servicios y dinero. La mano de obra, la tierra o el capital fluyen hacia las empresas para producir bienes o servicios. El dinero fluye de las empresas hacia los individuos en forma de salarios, rentas y beneficios. Gran parte de ese dinero vuelve a las empresas con la compra de productos o servicios. Y el valor total de todos los bienes y servicios de una economía se mide como producto nacional bruto (PNB).

3.2.6 El modelo de producción agregada

Por otra parte, el modelo de producción agregada explica cómo se realiza el proceso económico (Solow, R.M., 1957). Este modelo cuantifica los insumos de entrada al sistema económico —los factores de producción— y cómo se transforman en productos de salida, mediante la ecuación:

$$Y = A \times f(K, L) \quad 14$$

Donde Y , producto total (PIB), es una función de K , el stock de capital (el capital construido), L , la cantidad disponible de fuerza de trabajo y A , la componente tecnológica, que expresa el nivel de productividad global de los factores de producción.

El modelo del flujo circular (Figura 43) ilustra que los hogares e individuos ofrecen a las empresas los factores de la producción trabajo (L) y capital (K) (vía ahorros que financian la inversión). Con los cuales, más la tecnología disponible (A), las empresas producen los bienes y servicios (Y). El ingreso de los hogares e individuos proviene del pago de las empresas a los factores de producción. En el marco de la teoría neoclásica, la función de producción permite determinar el valor total de lo producido (Y), que se cuantifica mediante el PIB.

Generalmente, se utiliza la ecuación 14 con la formulación Cobb-Douglas⁷⁹:

$$Y = A \times K^\alpha \times L^\beta \quad 15$$

Donde α expresa la contribución del capital (K) y β la contribución del trabajo (L), considerando que $\alpha + \beta = 1$.

Por ejemplo, sabiendo que en los países desarrollados generalmente se estima que $\alpha = 0.3$ y $\beta = 0.7$, si se cuantifica un crecimiento de 5% del PIB, un incremento de 6% de K y un incremento de 2% de L ; la contribución de K será 1.8% y la contribución de L será 1.4%;

⁷⁹ <https://www.britannica.com/topic/Cobb-Douglas-function>

sumando una contribución total de 3.2% por parte de los factores de producción. ¿Dónde queda el 1.8% restante del crecimiento? Se adjudica al mejoramiento tecnológico, a la productividad global de los factores de la producción, o residuo de Solow (Solow, R.M. 1957).

3.3 Entropía del proceso económico

3.3.1 Antecedentes

Otros economistas (Ayres, R.U. & Warr, B. 2010), señalan que el residuo de Solow es la exergía, o fracción útil de cada joule invertido en el proceso productivo. Y muestran que la combinación de los factores capital (K) y trabajo (L) con el factor trabajo físico realizado por las máquinas —cuantificado como exergía⁸⁰ movilizada en el proceso de producción— explica casi la totalidad del crecimiento económico observado desde 1900 en los Estados Unidos y otros países desarrollados (Ayres, R.U. *et al*, 2003). Robert Ayres se cuenta entre los principales promotores de introducir la dimensión termodinámica en el proceso económico.

Pero fue Nicholas Georgescu-Roegen quien realizó, a partir de los años 1960, la crítica termodinámica fundamental a la teoría neoclásica de la economía. La crítica de Georgescu-Roegen constituye uno de los mayores desafíos de la teoría económica ortodoxa. Porque mientras que la corriente principal del pensamiento económico ha ignorado su obra, la actual preocupación por la creciente crisis ecológica planetaria reconoce su relevancia. Porque su mensaje central es que la economía debe reconocer que es un subsistema dentro de un sistema biofísico —la biosfera— gobernado por las leyes de la termodinámica. Porque hoy día la disyuntiva de la política económica es si prioriza la sostenibilidad y la viabilidad de largo plazo del desarrollo humano, o mantiene un crecimiento indefinido y una sociedad de consumo de corto plazo.

⁸⁰ Máximo trabajo útil que se puede extraer de un sistema a medida que alcanza un equilibrio reversible con su entorno. En pocas palabras: capacidad de cierto tipo de energía para realizar un trabajo.

<https://exergyconomics.wordpress.com/exergy-economics-101/what-is-exergy/>

3.3.2 Nicholas Georgescu-Roegen

Nicholas Georgescu-Roegen (NGR) nació un domingo 4 de febrero de 1906, en Constanza, Rumania y murió el domingo 30 de octubre de 1994, en Nashville, Tennessee, USA. Desarrolló una de las más profundas críticas a la teoría económica neoclásica; la más importante desde el punto de vista de la ecología⁸¹. Su obra creó las bases para el desarrollo de la economía ecológica y el movimiento a favor del decrecimiento. NGR es, sin duda, el más importante economista ecológico del siglo XX; y será —eso esperamos, apostamos a ello— plenamente reconocido en el curso del siglo XXI, conforme avance la transgresión de umbrales planetarios y la humanidad se vea obligada a reaccionar y ajustarse, finalmente, a los límites biofísicos que impone la biosfera.

La obra de NGR es interdisciplinaria (NGR, 1971). Puso a prueba la teoría económica con las leyes de la termodinámica y la dimensión biológica de la sociedad. Consideraba que la economía es en realidad una extensión de la evolución de *Homo sapiens* porque, a diferencia de los demás seres vivos, cuyos órganos son solamente endosomáticos —resultado de su evolución biológica—, el ser humano ha desarrollado **órganos exosomáticos** —resultado de su evolución tecnológica (NGR, 2013). Gracias a lo cual nos es posible cocinar, respirar bajo el agua, volar, trasladarse más rápido que un caballo y producir bienes y servicios en cantidades colosales. Quizás por eso abundan quienes creen que podemos continuar nuestra existencia violando leyes biofísicas.

Matemático de formación original, NGR fue un economista heterodoxo y, finalmente, un disidente, muy incómodo. Porque nadie podía enfrentarlo en el terreno de la econometría y, menos aún, en el terreno de la dimensión termodinámica del proceso económico (Carpintero, O., 2006). Proceso que la teoría económica supone circular y reversible, pero que en realidad es un proceso irreversible sujeto a la ley de la entropía.

⁸¹ <https://www.universalis.fr/recherche/nicholas%20georgescu-roegen/article/1/>

Este es el argumento central de NGR, el proceso económico es fundamentalmente entrópico, porque, además de transformar recursos de baja entropía (energía y materiales utilizables) en bienes y servicios, simultáneamente los transforma también en desechos (calor residual, desechos, emisiones, contaminación) de alta entropía. Lo cual contradice la suposición central neoclásica del modelo de flujo circular y del crecimiento perpetuo. Por consiguiente, **a largo plazo el crecimiento económico continuo es físicamente imposible**, porque los recursos de la Tierra de baja entropía son finitos y nunca podrán reciclarse al 100%.

NGR subraya que la economía neoclásica considera el proceso productivo como si fuera un sistema mecánico en equilibrio, utilizando modelos económicos que suponen que los procesos son reversibles, no obstante que la tercera realidad demuestre lo contrario. Por ejemplo, los combustibles fósiles no pueden recuperarse una vez quemados; las especies extintas son irrecuperables.

En particular, desafía la función de producción, enfatizando que los recursos naturales los subsume en el factor capital (K), o bien los trata como entrantes opcionales, cuando en realidad constituyen la base material de toda producción. Asimismo, por la suposición de que el capital (K) pueda sustituir indefinidamente recursos naturales, lo cual viola leyes físicas. No se puede hacer un pastel solamente con trabajo y equipo de cocina, se necesitan recursos naturales, trigo y energía.

Como alternativa al enfoque de la teoría económica neoclásica, NGR propone un enfoque bioeconómico⁸², que reconoce a los seres humanos como entidades biológicas y al proceso económico como extensión de la evolución de *Homo sapiens*, sujeto a las leyes de la termodinámica. Así, NGR distingue entre factores de fondo: capital (K) y trabajo (L); y factores de flujo: recursos naturales, materiales y energía, que son físicamente transformados y disipados en el proceso económico.

⁸² La vida no le dio suficiente tiempo a NGR para concluir su proyecto de publicar un tratado completo de bioeconomía, pero dejó algunos artículos y notas de conferencias que permiten hacerse una idea de la construcción teórica que deseaba concretar. (Véase en la Bibliografía).

3.3.3 El modelo de flujos-fondos

A diferencia de la función de producción neoclásica, que trata todos los insumos como factores homogéneos que solo difieren en cantidad, el modelo de flujos y fondos reconoce que los insumos desempeñan funciones cualitativamente diferentes en la producción (NGR, 1971, ch. 9). Esta distinción no es solamente semántica o clasificatoria, sino que refleja realidades físicas y termodinámicas que tienen profundas implicaciones para la teoría económica, la gestión de recursos y la sostenibilidad.

La idea central del modelo parece simple pero es profunda: no todos los factores de la producción son iguales. Difieren en cantidad o productividad marginal, pero también en su naturaleza y función dentro del proceso de producción. De donde NGR identifica dos categorías de factores⁸³: elementos de fondo F_i (donde $i = 1, 2, 3 \dots, n$), que representan a los agentes del proceso; y elementos de flujo R_j (donde $j = 1, 2, 3 \dots m$), que son los utilizados o aplicados por los agentes.

Los **elementos de fondo** existen al inicio del proceso de producción y siguen existiendo al final. Por ejemplo: la fuerza humana de trabajo (L); el capital (K) (maquinaria, herramientas, inmuebles, infraestructuras); o la tierra, como ubicación o plataforma.

Los **elementos de flujo**, entran al proceso y una parte pasa a formar parte del producto, en tanto que otra parte se degrada y se convierte en desechos o se disipa. Por ejemplo: materias primas (metales, madera, químicos); bienes intermedios de otros procesos de producción; y energía (combustibles, electricidad). Notablemente, los servicios ambientales (polinización, regulación climática, ciclos de nutrientes, asimilación de contaminación) también son elementos de flujo.

⁸³ Georgescu-Roegen, N. 1971. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, Mass. Harvard Univ. Press, pp 230 y siguientes. <https://archive.org/details/entropylaw00nich>

Esta distinción refleja las características físicas y temporales de cómo los diferentes insumos participan en la producción. Una máquina (fondo) puede producir muchas unidades a lo largo de su vida útil; la gasolina (flujo) se consume en un sólo uso. Un trabajador (fondo) vende servicios laborales, pero sigue siendo un agente independiente; el mineral de hierro (flujo) se transforma en la producción de acero.

A diferencia de los fondos, **los flujos sufren una transformación física irreversible** durante el proceso productivo. Esta transformación no es solo un cambio de propietario o ubicación (como suele suponer implícitamente la teoría neoclásica), sino una auténtica reconfiguración física y química: entran en el proceso de producción de una forma y salen de otra, ya sea como parte del producto o como residuo.

Los fondos prestan servicios medidos en unidades de tiempo (horas máquina, días de trabajo); en cambio, los flujos se miden en cantidades físicas: toneladas, litros, kilovatios hora, metros cúbicos (no se alquila carbón por horas, se consumen cantidades específicas). Además, los flujos suelen ser altamente divisibles —se pueden utilizar 150.7 toneladas de cemento, 425.3 kilovatios·hora de electricidad o 395.8 litros de amoniaco. Variabilidad que contrasta con la naturaleza discreta e indivisible de los fondos.

NGR subraya el carácter de rendimiento de los flujos, que fluyen a través del proceso de producción: entran, se transforman y salen. Este movimiento direccional es irreversible y difiere totalmente del carácter circular y reversible que los modelos neoclásicos atribuyen a los procesos económicos. El carácter de rendimiento de los flujos demuestra que **el proceso de producción utiliza necesariamente recursos naturales de baja entropía y genera desechos de alta entropía**. No es posible reciclar los flujos para devolverlos a su estado original sin gastar energía adicional y generar residuos adicionales; y la energía disipada es irrecuperable.

Por lo demás, NGR demuestra que la hipótesis neoclásica de la sustitución de factores es, en gran medida, ilusoria. Los fondos y los flujos se complementan entre sí: el capital (K) o la

fuerza de trabajo (L) no pueden producir sin energía y sin materiales; no puede haber sustitutos tecnológicos para todo recurso natural, porque no es posible transformar completamente fondos en flujos.

3.3.4 Ecuación del modelo de flujos-fondos

El proceso de producción en el modelo de flujos-fondos se caracteriza por:

- tener una duración τ , periodo de tiempo de un ciclo de producción
- cada fondo F_i provee servicios por un tiempo $t_i \leq \tau$
- cada flujo R_j requiere una cantidad de entrada r_j consumida durante el proceso.

De tal modo que el proceso de producción puede formularse como:

$$\{F_1(t_1), F_2(t_2), \dots, F_n(t_n); R_1(r_1), R_2(r_2), \dots, R_m(r_m)\} \rightarrow Q \quad 16$$

Es decir, cada fondo, del F_1 al F_n , provee servicios de duración t_1 hasta t_n ; cada flujo, del R_1 al R_m , es consumido en cantidades r_1 hasta r_m ; y el resultado es la cantidad producida Q .

Además, cada fondo impone límites de capacidad $k_i \times \sigma_i$ al servicio requerido; donde k_i es el número de unidades de cada fondo F_i y σ_i es la capacidad de servicio de cada unidad de fondo F_i por período de tiempo. Asimismo, cada fondo impone límites temporales, ya que solo puede prestar servicios hasta su capacidad máxima durante el tiempo disponible. Por ejemplo, si una fábrica posee siete máquinas ($k = 7$), cada una con capacidad de operar catorce horas diarias ($\sigma = 14$ hrs/día), la capacidad total de servicio es de 98 máquinas-horas por día.

Para cada flujo se incorpora una ecuación de equilibrio que refleje la primera ley de la termodinámica (conservación de la masa/energía). Para el flujo de materiales:

$$r_{j(input)} = r_{j(produced)} + r_{j(waste)} \quad 17$$

Lo que significa que todo material de entrada debe contabilizarse no solamente como producto de salida, sino también su fracción de desecho.

Para el flujo de energía:

$$E_{input} = E_{useful} + E_{dissipated} \quad 18$$

Donde E_{useful} es la exergía, lo que implica que de toda energía de entrada (de baja entropía) debe contabilizarse la fracción disipada (de alta entropía), perdida en el proceso.

La ecuación 16 también involucra coeficientes tecnológicos. Por una parte, coeficientes a_i de salida de los fondos:

$$a_i = t_i/Q \quad 19$$

Lo que expresa que para producir Q unidades se necesita utilizar el fondo F_i durante un tiempo t_i .

Por otra parte, coeficientes b_j de salida de los flujos:

$$b_j = r_j/Q \quad 20$$

Lo que refleja la cantidad r_j de materia y energía necesaria por cada unidad producida.

Estos coeficientes suelen establecerse por cada tecnología y a corto plazo. Porque, por ejemplo, no se puede variar fácilmente la cantidad de acero necesaria para cada unidad automotriz producida, o el tiempo de máquina requerido por unidad, ya que están determinados por las especificaciones técnicas.

Una vez establecidos coeficientes tecnológicos y límites de capacidad de los fondos, el máximo nivel de producción puede formularse; para la producción límite de fondos:

$$Q_{max,i} = (k_i \times \sigma_i \times T) / a_i \quad 21$$

Donde T es el período planificado y la producción máxima está limitada por la capacidad del fondo F_i .

Y para la producción límite de flujos:

$$Q_{max,j} = R_{available,j} / b_j \quad 22$$

Donde la producción máxima está limitada por los flujos R_j disponibles.

Finalmente, la producción real puede expresarse como:

$$Q = \min\{Q_{max,1}, Q_{max,2}, \dots, Q_{max,i}; Q_{max,1}, Q_{max,2}, \dots, Q_{max,j}\} \quad 23$$

Lo que expresa que la producción estará limitada por el recurso más escaso; cualquier flujo o fondo puede imponer esta restricción.

3.3.5 Longevidad industrial de *Homo sapiens*

Ya desde los inicios del pensamiento económico, algunos economistas (Smith, Ricardo, J.S. Mill) postularon el concepto de estado estacionario de una economía (Uçak, A., 2013) previendo que, tarde o temprano, todas se estabilizarían en un estado final estacionario, caracterizado por un stock constante de riqueza física (capital) y una población de tamaño constante.

Y desde la década de 1970 el concepto de estado estacionario quedó asociado principalmente con el destacado economista ecológico Herman Daly (1980 & 1991 [1977]), quien incorporó la dimensión ecológica de los flujos de recursos naturales a través de la economía.

Pero NGR, con su estricto espíritu científico, explicó por qué alcanzar una economía en estado estacionario no resolvería —más que transitoriamente— el problema de fondo de la sostenibilidad a largo plazo, a propósito de lo cual presenta un relevante teorema sobre el límite temporal de supervivencia del *Homo sapiens* industrial (NGR 2011b, p. 126).

Los recursos naturales de flujo RN_f son los que provienen directamente de la energía solar, la fotosíntesis (biomasa), o solar más gravedad (hidráulica, eólica). Los recursos naturales de stock RN_s provienen indirectamente de la energía solar (combustibles fósiles); y de la formación geológica e historia de la Tierra (minerales, metales, geotermia, nuclear).

Los RN_f son, en principio, inagotables porque son renovables (siempre y cuando sus capacidades regenerativas no sean transgredidas por *Homo sapiens*). En cambio, los RN_s son finitos y, tarde o temprano, se agotarán: Por ello, fundar la civilización de *Homo sapiens* sobre estos recursos —en lugar de los RN_f —, va en sentido contrario a la viabilidad de largo plazo de las generaciones futuras aunque, por supuesto, satisfaga egoístamente los intereses de corto plazo de las generaciones actuales.

Si consideramos S el stock total de RN_s (lo que NGR denomina «la dote» de la humanidad), P_t la población humana en el tiempo y s_t la fracción de S utilizada por habitante por año, tenemos que la longevidad L de la civilización industrial es:

$$L = \sum_{t=1}^n P_t \quad 24$$

Donde S constituye el límite superior para L por la restricción:

$$\sum_{t=1}^n P_t \times s_t \leq S \quad 25$$

Para un tiempo $t_{lim} > n$, cuando la utilización acumulada de las fracciones s_t hayan agotado el stock finito S , la sumatoria será:

$$\sum_{t=1}^{t_{lim}} P_t \times s_t = S \quad 26$$

Y por consiguiente:

$$P_{t_{LIM}} = 0 \quad 27$$

Este tiempo límite t_{lim} corresponde a la longevidad L de la población humana en las condiciones de su civilización industrial, una vez agotados los recursos naturales de stock RN_s . Resulta evidente que a mayor tasa de extracción y utilización de s_t (flujo de materiales, sección 1.5), más rápidamente llegaremos a t_{lim} y menor será L .

Más allá de las propuestas de «economía estacionaria» (Daly H.E. 1980 & 1991 [1977]), una cuestión clave se desprende del pensamiento de NGR: para que la probabilidad de extinción⁸⁴ de *Homo sapiens* se mantenga suficientemente cercana a cero (o, al menos, lejana de 1) es indispensable que, en algún momento del futuro previsible, la economía humana restablezca sus soportes económicos sobre los RN_f y no los RN_s . Lo cual implica mucho más de lo que hoy se plantea como «desacoplamiento»⁸⁵ del crecimiento económico respecto del agotamiento de recursos naturales.

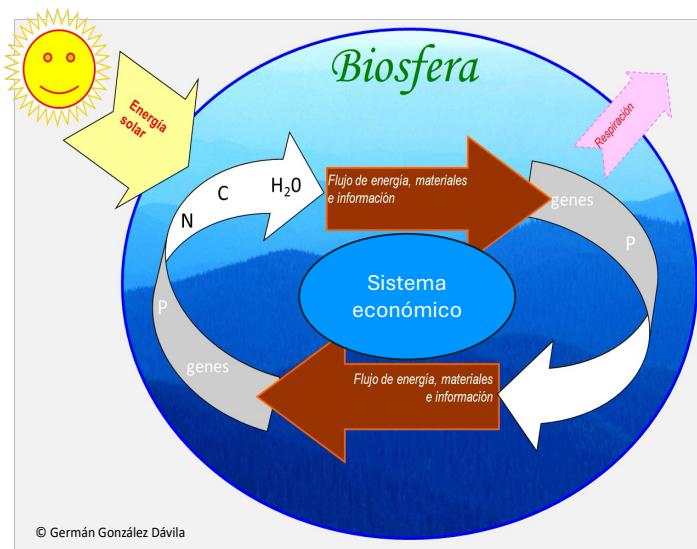
⁸⁴ <https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/extinction-probability>

⁸⁵ En economía ambiental, el «desacoplamiento» se refiere a la posibilidad de crecer sin el correspondiente incremento de la degradación ambiental (UNEP, 2011; UNEP, 2024; OECD, 2011).

Conclusiones

La crítica de Nicholas Georgescu-Roegen constituye un desafío a los fundamentos de la teoría económica ortodoxa. Y aunque, hasta el presente, la teoría económica dominante haya ignorado en gran medida su obra, la creciente crisis ecológica global obliga, cada vez más, a reconocer sus ideas. Su mensaje central es más relevante y significativo que nunca: la teoría económica ignora las leyes de la física y de la biología, pues no toma en cuenta que el sistema económico es un subsistema de la biosfera, una extensión exosomática de la evolución humana, lo cual impone restricciones biofísicas no negociables.

Figura 44. El sistema económico es un subsistema del sistema termodinámico biosfera, no un sistema aislado, lo cual impone restricciones biofísicas no negociables.



Fuente: Elaboración propia.

El proceso económico es fundamentalmente entrópico, porque para producir bienes y servicios transforma recursos de baja entropía (energía y materia utilizables) en bienes y servicios y sus desechos (residuos, emisiones, contaminación, calor residual) de alta entropía. Es un proceso irreversible que evoluciona gobernado por las leyes de la termodinámica, no un fenómeno reversible, lo cual contradice las suposiciones neoclásicas del modelo de flujo circular y de la posibilidad de un crecimiento perpetuo.

El crecimiento económico perpetuo es físicamente imposible a largo plazo, porque los recursos de baja entropía de la Tierra son finitos y no pueden reciclarse al 100%. Todo reciclaje utiliza más energía, genera desechos adicionales y disipa más energía.

Los modelos de la teoría económica neoclásica tratan todos los insumos como factores homogéneos que solo difieren en cantidad; no integran los recursos naturales y la energía como factores de producción indispensables. No distinguen entre factores de fondo y factores de flujo. Y profesan un tecno-optimismo ingenuo que supone posible sustituir, *ad infinitum*, recursos naturales con nuevas tecnologías.

El concepto de desarrollo sostenible es un oxímoron porque su definición incluye el crecimiento económico, lo cual es insostenible a largo plazo. El enfoque de análisis sobre los límites planetarios (Capítulo 2) demuestra que el crecimiento económico, exponencial desde la Gran Acceleración (Sección 1.4), ha transgredido ya la mayor parte de estos límites biofísicos (Figura 19).

Los resultados centrales del estudio del Club de Roma sobre los límites del crecimiento (Sección 1.1) mantienen su vigencia. Sus predicciones sobre que la degradación ambiental y la contaminación alcanzarían un máximo durante los años 2030 y que la población continuaría creciendo hasta los años 2050 ya se alcanzan a ver en el horizonte del futuro próximo. Todo parece indicar que su evaluación de que alcanzar un «equilibrio» ecológico y económico, una sociedad sostenible, sólo será posible a condición de aplicar políticas estabilizadoras que detengan el crecimiento de las variables población e industrialización, antes de finalizar el siglo XXI.

En todo caso, hoy día es innegable que la civilización industrial de *Homo sapiens* ha excedido el espacio planetario seguro (Capítulo 2) para su supervivencia y desarrollo (Figuras 7 y 19), colocando en alto riesgo el bienestar humano del presente y la viabilidad de las generaciones futuras.

Resultan de especial interés los intentos de algunos economistas ortodoxos —Robert Ayres, entre ellos—, que han intentado integrar la dimensión termodinámica en la función de producción agregada, incorporando la energía como cuarto factor:

$$Y = A \times f(K, L, E) \quad 28$$

Faltaría incorporar la materia (residuos, emisiones y desechos de todo tipo) y energía disipados, los recursos naturales que forman parte del proceso económico desde el punto de vista termodinámico. Aunque incluso así nos encontraríamos en una **situación de sostenibilidad débil** porque, al añadir el factor de los recursos naturales N en esta ecuación:

$$Y = A \times K^\alpha \times L^\beta \times N^\gamma \quad 29$$

De lo cual se puede implicar que:

$$N^\gamma = \frac{Y}{(A \times K^\alpha \times L^\beta)} \quad 30$$

Lo cual supone que el factor recursos naturales N^γ puede reducirse proporcionalmente al incremento del factor capital K^α y/o del factor tecnológico A . Suposición que valida la sustitución de recursos naturales con capital y tecnología (Daly, E.H. 1997).

Pero ni siquiera esto ha sido integrado por la corriente dominante de la economía económica neoclásica.

Por cuanto a las propuestas de que una economía en estado estacionario pueda convertirse en alternativa de sostenibilidad, en realidad se trata de un concepto que ha evolucionado desde la predicción económica clásica hasta convertirse en una necesidad ecológica moderna. Ya algunos economistas clásicos de los siglos XVIII y XIX como John Stuart Mill, Adam Smith y David Ricardo lo veían como un resultado eventual (y potencialmente deseable o fatal) del desarrollo económico. Economistas ecológicos contemporáneos como

Herman Daly⁸⁶, Robert Costanza⁸⁷, Tim Jackson⁸⁸, Peter Victor⁸⁹, Kate Raworth⁹⁰ o Kenneth Boulding⁹¹, sostienen que es un requisito urgente si se quiere alcanzar la sostenibilidad.

Hay que señalar que los economistas que realizan la crítica al crecimiento perpetuo, también ofrecen visiones alternativas de prosperidad, bienestar y florecimiento humano dentro de los límites ecológicos. Ya sea a través de los límites de producción de Daly, el marco de prosperidad de Jackson o los límites del *doughnut*⁹² de Raworth, proporcionando fundamentos teóricos y propuestas de política para un paradigma económico fundamentalmente diferente.

De tal modo, el estado estacionario pasó de ser considerado un destino lejano a ser reconocido una necesidad inmediata. El cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la transgresión de ciclos biogeoquímicos y demás límites planetarios transgredidos imponen la transición desde una economía dependiente del crecimiento hacia una economía de estado estacionario como uno de los retos centrales del siglo XXI.

Nicholas Georgescu-Roegen va más allá. Explica por qué alcanzar una economía de estado estacionario tampoco haría posible lograr la sostenibilidad a largo plazo⁹³. Lo cual demuestra con su teorema sobre la longevidad industrial de la humanidad (ecuaciones 24, 25, 26 y 27). Aunque se trate de una perspectiva de muy largo plazo, aborda **el problema central de nuestro tiempo**: cómo resolver el conflicto de estrategias para resolver los desafíos de corto plazo y los desafíos de largo y muy largo plazo. En el corto plazo lo urgente es la erradicación de la pobreza —para lo cual la receta indiscutible —hasta ahora— parece ser el crecimiento

86 <https://steadystate.org/herman-daly/>

87 <https://www.robertcostanza.com>

88 <https://timjackson.org.uk/category/publications/>

89 <https://www.pvictor.com>

90 <https://www.kateraworth.com/publications/>

91 https://arachnid.biosci.utexas.edu/courses/thoc/readings/boulding_spaceshipearth.pdf

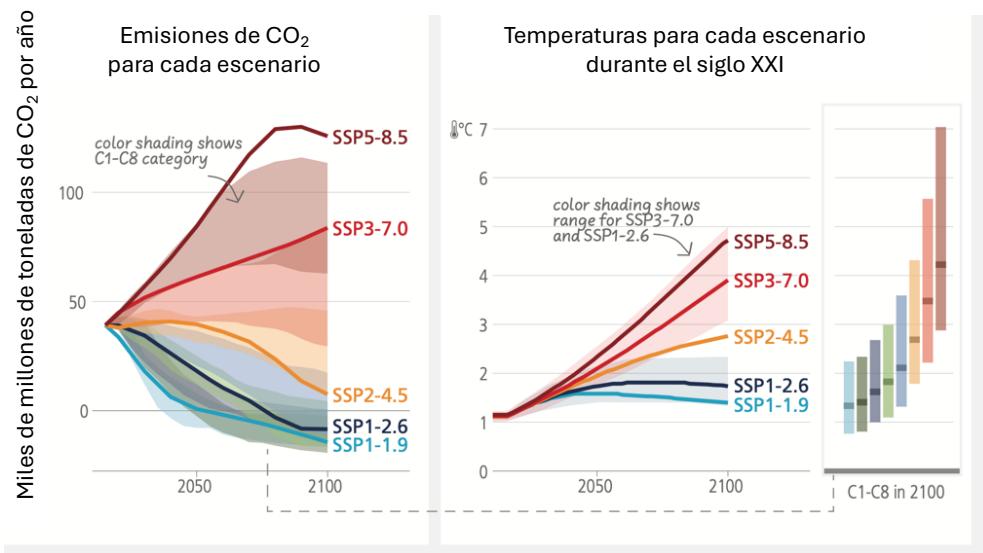
92 <https://www.kateraworth.com/doughnut>

93 Lo que muestra con toda claridad la salida del escenario óptimo del estudio sobre *The Limits to Growth* (Figura 9), la curva del stock de recursos no renovables continúa reduciéndose hasta su agotamiento (en algún momento del siglo XXII, según la tendencia que muestra hacia el futuro).

económico. En el largo plazo lo urgente es empezar a resolver cómo nos adaptaremos a un mundo caracterizado por la sexta gran extinción de biodiversidad, un sobrecaleamiento promedio global de tres o más Centígrados —respecto de la temperatura promedio durante el Holoceno— y el estrés hídrico.

Los escenarios socioeconómicos compartidos (SSPs⁹⁴, por sus siglas en inglés), que el IPCC actualizó en su sexto reporte de evaluación (IPCC, 2023), describen las trayectorias posibles de crecimiento, o decrecimiento, de las emisiones de gases de efecto invernadero hacia 2100, lo que dependerá del comportamiento de los diversos factores causales. El reporte considera cinco principales trayectorias posibles, denominadas SSP1-1.9 (muy bajas emisiones, +1.5°C), SSP1-2.6 (bajas emisiones, +2°C), SSP2-4.5 (emisiones intermedias, +3°C), SSP3-7.0 (altas emisiones, +4°C) y SSP5-8.5 (muy altas emisiones, +5°C); trayectorias que muestran que hay que ser muy optimistas para aspirar a que la comunidad internacional logre algo mejor que el escenario intermedio SSP2-4.5 (Figura 45).

Figura 45. Los cinco escenarios básicos SSP del IPCC hacia el 2100.



Fuente: a partir de la figura a, p. 65, IPCC 2023.

⁹⁴ Shared Socioeconomic Pathways.

La única opción es dejar de crecer de la manera que se viene haciendo desde el siglo XX. Lo cual implica que los países más desarrollados debieran frenar su crecimiento —tanto como reducir drásticamente sus emisiones de gases de efecto invernadero—, en tanto que los países menos desarrollados mantendrían su derecho a crecer. Porque, mientras los más desarrollados acumularon riquezas durante siglos gracias al saqueo de recursos naturales y fuerza humana de trabajo de sus colonias, éstas se mantuvieron en un insuficiente desarrollo y en la pobreza. Por ello, en toda justicia climática y ambiental histórica, solamente los países en desarrollo están en derecho de continuar su crecimiento, particularmente los más atrasados.

También es un problema de prioridades sectoriales, como es el caso de los sectores de la salud, la educación, o los servicios personales. Porque el crecimiento sostenido del PIB que se observa desde la Gran Aceleración y, particularmente, desde la década de 1970 a la fecha mantiene como mayores beneficiarias a las grandes fortunas y corporaciones del mundo, mientras que el sector laboral y las clases medias se empobrecen —como bien lo señala Thomas Piketty (2013).

Sería sumamente útil —así como el IPCC ha desarrollado escenarios de reducción o incremento de las emisiones de GEI— que, con base en sus estudios sobre extracción de recursos naturales (UNEP, 2011 & 2024), las Naciones Unidas pudieran asimismo desarrollar escenarios de desaceleración del flujo de materiales y energía, por región, por país y por grupo de países, considerando grados de desarrollo y respectivos IDH.

El caso es que la obra de NGR, además de dar soporte al desarrollo del movimiento de la economía ecológica⁹⁵, también dio fundamento teórico al movimiento del decrecimiento⁹⁶.

⁹⁵ La International Society of Ecological Economics: <https://www.isecoeco.org>; que edita la revista *Ecological Economics* desde 1989: <https://www.sciencedirect.com/journal/ecological-economics>; así como a la European Association for Bioeconomic Studies, que condujo a la World Bioeconomy Association: <https://bioeconomyassociation.org> y la European Bioeconomy University: <https://www.agroparistech.fr/en/international/international-partnerships/european-bioeconomy-university-ebu-alliance>

⁹⁶ La International Degrowth Network: <https://degrowth.net>; Research & Degrowth International: <https://degrowth.org>; Institut d'études économiques et sociales pour la décroissance soutenable : <http://www.decroissance.org>

Movimiento desarrollado, entre otros, por André Gorz⁹⁷, Serge Latouche⁹⁸, Vincent Cheynet⁹⁹, Jacques Grinevald¹⁰⁰, Tim Jackson¹⁰¹, Joan Martínez Alier¹⁰² y Óscar Carpintero (2006).

A la vista de toda la información y de los mejores conocimientos científicos disponibles, los límites físicos del crecimiento ya han sido rebasados (Capítulo 2, Figura 19). Las políticas estabilizadoras aplicadas hasta el presente son totalmente insuficientes. Las emisiones de gases de efecto invernadero continúan creciendo; la extinción de biodiversidad y el estrés hídrico se incrementan; los residuos plásticos también, así como todo tipo de desechos y contaminación. La Gran Aceleración continúa exponencialmente. El escenario tendencial anuncia que el rebase continuará en todos los órdenes (excepto, quizás, ojalá, el adelgazamiento y perforación de la capa de ozono).

Parece entonces que el problema ya no es si decrecimiento sí, o decrecimiento no; el problema es cómo lo solucionaremos cuando los límites biofísicos de la biosfera nos lo impongan...

Como anunciaba Nicholas Georgescu-Roegen: «*Quizás el destino de la humanidad sea tener una vida breve pero febril, emocionante y extravagante, en lugar de una existencia larga, vegetativa y monótona [...] Así, aunque el Homo sapiens sapiens pueda comprender lo que debe hacer por su salvación ecológica, su naturaleza le impide seguir el consejo de la sabiduría. Es cierto que hay una crisis energética, pero parece que la verdadera crisis es la crisis de la sabiduría humana*» (NGR, 2011d).

⁹⁷ <https://www.eyrolles.com/Accueil/Auteur/andre-gorz-72941/>

⁹⁸ <https://www.eyrolles.com/Accueil/Auteur/serge-latouche-21850/>

⁹⁹ <https://vincent.chey.net>

¹⁰⁰ <https://www.eyrolles.com/Accueil/Auteur/jacques-grinevald-83462/>

¹⁰¹ <https://timjackson.org.uk/category/publications/>

¹⁰² https://www.socioeco.org/bdf_auteur-1737_fr.html



Nicholas Georgescu-Roegen (1906-1994)

Bibliografía

- Ayres, R.U., Ayres, L.W. & Warr, B. (2003). Exergy, power and work in the US economy, 1900–1998. *Energy*, Volume 28, Issue 3, March 2003, Pages 219-273.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544202000890?via%3Di_hub
- Ayres, R. U. & Warr, B. (2010). *The Economic Growth Engine. How Energy and Work Drive Material Prosperity*. Ed. Elgar Publ. Inc., UK.
- Bardi, U. & Álvarez-Pereira, C. (2022). *Limits and Beyond: 50 years on from The Limits to Growth, what did we learn and what's next?* Exapt Press.
<https://www.clubofrome.org/limits-to-growth/limits-and-beyond/>
- Barton, J. & Gutiérrez-Antinopai, F. (2020). Towards a Visual typology of Sustainability and Sustainable Development. *Sustainability* 2020, 12(19), 7935.
<https://doi.org/10.3390/su12197935>
- Boulding, K. (1966). The Economics of the Coming Spaceship Earth. In: Jarrett, H., Ed., *Environmental Quality in a Growing Economy, Resources for the Future*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 3-14.
https://arachnid.biosci.utexas.edu/courses/thoc/readings/boulding_spaceshipearth.pdf
- Carpintero, O. (2006). *La Bioeconomía de Georgescu-Roegen*. Ed. de Intervención Cultural, España.
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Crest Book, Fawcett Pub. Greenwich, Conn.
https://library.uniteddiversity.coop/More_Books_and_Reports/Silent_Spring-Rachel_Carson-1962.pdf
- Ceballos, H., Ehrlich, P. R., Barnosky A. D., García, A., Pringle, R. M., Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Sci. Adv.* 1.e1400253.
- Cheynet, V. (2008). *Le choc de la décroissance*. Collection L'histoire immédiate, Ed. Seuil.
- Costanza, R., Cumberland, J.H., Daly, H. & Doodland, R. (2015). *An Introduction to Ecological Economics* (2nd ed.). CRC Press.
- Costanza, R. (2023). *Addicted to Growth: Societal Therapy for a Sustainable Wellbeing Future*. Routledge, New York.

- Cowle, R. H., Bouchet, P. & Fontaine, B. (2022). The sixth mass extinction: Fact, fiction or speculation? *Biol. Rev.* 97, 640—663.
- Crockford, H. D. & Knight, S. B. (1968). *Fundamentos de Fisicoquímica*. Ed. Continental, México.
- Daly, Herman E. (1980). *Economics, Ecology, Ethics. Essays Towards a Steady-State Economy*. (2nd ed.). San Francisco, W. H. Freeman & Co.
https://www.uvm.edu/~jdericks/EE/Daly_Ends_n_Means.pdf
- Daly, Herman E. (1991) [1977]. *Steady-State Economics* (2nd ed.) Washington, DC. Island Press. <http://pombo.free.fr/daly1991.pdf>
- Daly, Herman E. (1997). Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. *Ecological Economics* 22 (1997) 261–266.
- Georgescu-Roegen, Nicholas. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Georgescu-Roegen, N. (2011a). La loi de l'entropie et le problème économique. Chapitre 1 en Grinevald, J. & Rens, I. 2011. *La décroissance. Entropie, Écologie, Économie*. E. Sang de la Terre, FR.
- Georgescu-Roegen, N. (2011b). L'énergie et les mythes économiques. Chapitre 2 en Grinevald, J. & Rens, I. 2011. *La décroissance. Entropie, Écologie, Économie*. E. Sang de la Terre, FR.
- Georgescu-Roegen, N. (2011c). L'état stable et le salut écologique : une analyse thermodynamique. Chapitre 3 en Grinevald, J. & Rens, I. 2011. *La décroissance. Entropie, Écologie, Économie*. E. Sang de la Terre, FR.
- Georgescu-Roegen, N. (2011d). La dégradation entropique et la destinée Prométhéenne de la technologie humaine. Chapitre 4 en Grinevald, J. & Rens, I. 2011. *La décroissance. Entropie, Écologie, Économie*. E. Sang de la Terre, FR.
- Georgescu-Roegen, N. (2013). De la science économique à la bioéconomie. En Missemér, A. 2013. *Nicholas Georgescu-Roegen, pour une révolution bioéconomique*. Éd. École normale supérieure de Lyon, FR.
- González-Dávila, G. (2017). Transgresión de umbrales planetarios y desarrollo sustentable. *Configuraciones* 44, mayo-agosto 2017, *Rev. Fund. Pereyra e IETD*, México, Pág. 54 – 79.
https://www.glocalfilia.com/Biblio/Biosphere/170901_Transgr.UP_Config44.pdf

- González-Dávila, G. (2025). Día del rebase ecológico planetario 2025. *Glocalfilia* web site. <https://www.glocalfilia.com/dia-del-rebase-ecologico-planetario-2025/>
- Gorz, A. (2021). *André Gorz et l'écosocialisme*. Collection Les précurseurs de la décroissance. Ed. Le passager clandestin.
- Grinevald, J. (2008). *La biosphère de l'Anthropocène*. Georg éditeur. FR.
- Grinevald, J. & Rens, I. (2011). *La décroissance. Entropie, Écologie, Économie*. E. Sang de la Terre, FR.
- Hardin, G. (1968). The Tragedy of the Commons. *Science*, Vol. 162, 3859, pp 1243-1248, 13 dec. 1968.
- Hutchinson, G. E., et al (1970). The Biosphere. *Sci. Am. Sp. Iss.*, Sept. 1970, Vol. 223, Num. 3. <https://www.glocalfilia.com/the-biosphere/> (dic. 2024).
- IEA (2025). *Global Energy Review 2025*. IEA Publications, Paris, FR. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b169aa1-bc88-4c96-b828-aaa50406ba80/GlobalEnergyReview2025.pdf>
- IPCC (2023) *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- IUCN (1951). *État de la protection de la nature dans le monde en 1950*. UNESCO, Bruxelles. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/1951-002.pdf>
- Jackson, T. (2017). *Prosperity without Growth. Foundations for the Economy of Tomorrow* (2nd ed.). Routledge, New York.
- Kleidon, A. (2023). Sustaining the Terrestrial Biosphere in the Anthropocene: A Thermodynamic Earth System Perspective. *Ecology, Economy and Society—the INSEE Journal*, 6(1), 53–80. <https://doi.org/10.37773/ees.v6i1.915> & <https://ecoinsee.org/journal/ojs/index.php/ees/article/view/915>
- Latouche, S. (2024). *La décroissance*. Collection Que sais-je, PUF.
- Martínez Alier, J. (1994). La economía ecológica de Nicholas Georgescu-Roegen. En: Martínez Alier, J. 1994. *De la Economía Ecológica al Ecologismo Popular*. Barcelona, Icaria, pp. 33-50.

Marx, K. *Critica al Programa de Gotha*. Ediciones en Lenguas Extranjera, Pekín (Beijing), República Popular China, (1979). <https://www.marxists.org/espanol/m-e/1870s/gotha/critica-al-programa-de-gotha.htm>

Meadows, Donella H; Meadows, Dennis L; Randers, Jørgen; Behrens III, William W. (1972). *The Limits to Growth; A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books. ISBN 0876631650: <https://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf>

Meadows, D. H. & Randers, J. (1992). *Beyond the limits: Confronting Global Collapse, Envicionins a Sustaiable Future*. Chelsea Green Pub Co. UK.

Meadows, D. H., Randers, J. & Meadow, D. (2005). *Limits to Growth: The 30-Year Update*. Earthscan, London, UK. <https://www.peakoilindia.org/wp-content/uploads/2013/10/Limits-to-Growth-updated.pdf>

Missemer, A. (2013). *Nicholas Georgescu-Roegen, pour une révolution bioéconomique*. Éd. École normale supérieure de Lyon, FR.

Molina, M. J. & Rowland, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone, *Nature* 249, 810-812. <https://www.nature.com/articles/249810a0>

Nørgård, J. S., Peet, J., Ragnarsdóttir, K. V. (2010). "The History of The Limits to Growth". *The Solutions Journal*. 1 (2): 59–63. <https://web.archive.org/web/20140720093436/http://thesolutionsjournal.com/node/569> (dic. 2024)

Ostrom, E. (1990). *Governing the Commons. The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge, Univ. Press. https://www.actu-environnement.com/media/pdf/ostrom_1990.pdf

OECD (2011). *Towards Green Growth*. OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264111318-en>

OECD (2019). *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>

Odum, E. P. (1971). *Fundamentals of Ecology*. Third Edition. Philadelphia, Saunders.

Odum, H. T. (1971) *Environment, Power and Society*. Wiley-Interscience, New York, 232 pp.

Pearce, D. & Atkinson, G. (1993). Midiendo el desarrollo sustentable. *Ambiente y Desarrollo*, diciembre 1993.

Piaser, G. (2024). Kaldor's magic "Magic Square". *IPAG Working Paper*. IPAG Business School.

https://www.researchgate.net/publication/380819422_Kaldor's_magic_Magic_Square

Piketty, Th. (2013). *Le capital au XXIe siècle*. Coll. Les livres du nouveau monde ; Ed. Seuil, FR.

<https://www.seuil.com/ouvrage/le-capital-au-xxie-siecle-thomas-piketty/9782021082289>

Planetary Boundaries Science (PBScience). (2025). *Planetary Health Check 2025*.

Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam, Germany.

<https://planetaryhealthcheck.org>

Randers, J. (2012). *2052: A Global Forecast for the Next Forty Years*. Chelsea Green Pub Co. UK.

Rockström, J., Steffen, W. et al. (2009a). A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472-475 (2009). <https://www.nature.com/articles/461472a>

Rockström, J. Steffen, W. et al. (2009b). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society* Vol.14(2): 32.
<https://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>

Saito, K. (2024). *Slow Down. How Degrowth Communism Can Save the Earth*. Weidenfeld & Nicolson, London.

Savini, F (2024). Post-Growth, Degrowth, the Doughnut, and Circular Economy: A Short Guide for Policymakers. J. of City Climate Policy and Economy, V. 2, Num. 2.

Smil, V. (2022). *How the World Really Works. A Scientist's Gide to Our Past, Present and Future*. Penguin Random House, UK. 326 pp. <https://vaclavsmil.com>
https://www.glocalfilia.com/Biblio/Vaclav_Smil/2022_HowWorldRWorks_VSmil.pdf

Solow, R. M. (1957). Technical Change and the Aggregate Production Function. *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 39, No. 3 (Aug. 1957), pp. 312-320.
<http://www.piketty.pse.ens.fr/files/Solow1957.pdf>

Steffen, W., W. Broadgate, L. Deutsch, O. Gaffney, C. Ludwig. (2015). The trajectory of the Anthropocene: The great acceleration. *The Anthropocene Review* 2: 81–98.

- Uçak, A. (2013). The sentiments of Adam Smith relating to economic growth as an inspirer to modern growth theories. *Haziran* 2013 Cilt 15 Sayı 1 (29-48).
<https://behmedicalbulletin.org/pdf/f69f6526-3e5c-4123-aafc-55402bd6a6ec/articles/trakyasobed.174/29-48.pdf>
- United Nations Environment Programme (2011). *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth*. A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel. Fischer-Kowalski, M., Swilling, M., von Weizsäcker, E.U., Ren, Y., Moriguchi, Y., Crane, W., Krausmann, F., Eisenmenger, N., Giljum, S., Hennicke, P., Romero Lankao, P., Siriban Manalang, A., Sewerin, S.
<https://wedocs.unep.org/items/c337f278-f250-40a6-bcc0-57da308b2e0d>
- United Nations Environment Programme (2024). *Global Resources Outlook 2024: Bend the Trend – Pathways to a liveable planet as resource use spikes*. International Resource Panel. Nairobi.
<https://www.unep.org/resources/Global-Resource-Outlook-2024>
<https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook-2024>
- United Nations, DESA, Population Division (2024). *World Population Prospects 2024*.
<http://population.un.org/wpp/>
- Van Vuuren, DP et al. (2025). Exploring pathways for world development within planetary boundaries. *Nature* 641, 910-916, 2025.
<https://doi.org/10.1038/s41586-025-08928-w>
- Victor, P. A. (2019). *Managing Without Growth. Slower by Design, Not Disaster* (2nd ed.). Elgar, Ed.
- Wackernagel, M. (1994). *Ecological Footprint and Appropriated Carrying Capacity: A Tool for Planning Towards Sustainability*. PhD Thesis, Univ. Brit. Columbia, Canada. <https://open.library.ubc.ca/media/stream/pdf/831/1.0088048/1>
- World Commission on Environment and Development (1987). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press. p. 27. ISBN 019282080X
<https://digitallibrary.un.org/record/139811?v=pdf> &
<https://www.brundtland.co.za/other-publication/brundtland-report-1987-our-common-future/>
- WRI. (2005). *Ecosistemas y Bienestar Humano: Marco para la Evaluación*. Millennium Ecosystem Assessment.
<http://www.millenniumassessment.org/documents/document.3.aspx.pdf>