



# A través del ojo de una aguja: Una perspectiva eco- heterodoxa sobre la transición hacia las energías renovables

Volumen 14 · Número 15 | Agosto (1) 2021

# Por el ojo de una aguja: Una perspectiva eco-heterodoxa sobre la transición a las energías renovables

*Megan K. Seibert*<sup>1,\*</sup> y *William E. Rees*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> The REAL Green New Deal Project, Albany, OR 97321, USA; [wrees@mail.ubc.ca](mailto:wrees@mail.ubc.ca)

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Aplicadas, Escuela de Planificación Comunitaria y Regional, Universidad de British Columbia, Vancouver, BC V6T 1Z2, Canadá.

\* Correspondencia: [megan.seibert@realgnd.org](mailto:megan.seibert@realgnd.org)

**Cita:** Seibert, M.K.; Rees, W.E. Through the Eye of a Needle: An Eco-Heterodox Perspective on the Renewable Energy Transition. *Energies* 2021, 14, 4508. <https://doi.org/10.3390/en14154508>

**Editor académico:** Alessia Arteconi

**Recibido:** 23 de junio de 2021

**Aceptado:** 20 de julio de 2021

**Publicado:** 26 de julio de 2021

**Nota del editor:** MDPI se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones institucionales.

**Traducción al castellano para 15/15/15:** Moisès Casado. **Revisión:** Manuel Casal Lodeiro

**Traducción disponible en** <https://www.15-15-15.org/webzine/descargas-gratuitas/>

**Fuente:** <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/15/4508>

**Copyright:** © 2021 por los autores. Licencia de MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de libre acceso distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

# Índice de contenidos

<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2. El cambio climático en el contexto del sobrepasamiento</b>	<b>4</b>
<b>3. Problemas de las llamadas energías renovables</b>	<b>6</b>
3.1. La cuestión de la electrificación	8
3.1.1. Comprobación de la validez de la visión general	8
3.1.2. Calor para la fabricación	8
3.1.3. Problemas de los paneles solares	12
3.1.4. Problemas de las baterías y otros almacenamientos	13
3.1.5. Problemas de la energía eólica	15
3.1.6. Impactos ecológicos de la energía hidroeléctrica	16
3.1.7. Problemas de la energía nuclear	16
3.1.8. La extracción de metales y sus injusticias sociales	17
3.1.9. Problemas del secuestro tecnológico del carbono	18
3.1.10. Subvención oculta de los combustibles fósiles	19
3.1.11. Ganancias de rendimiento en la extracción de energía	19
3.1.12. La cuestión de los combustibles líquidos	20
3.1.13. Biocombustibles frente a la producción de alimentos	20
3.1.14. La quimera de otros combustibles sintéticos	21
3.1.15. Electrificación del transporte	21
<b>4. Resumen. Y lo único que podría salvar a la civilización de la más completa ruina</b>	<b>22</b>
4.1. Realismo energético	23
4.2. Reducción de la población	24
4.3. Contracción y transformación radical de la sociedad	26
<b>Referencias</b>	<b>28</b>

# Resumen

Nos sumamos al emergente cuerpo de bibliografía que señala las grietas en los cimientos de la narrativa dominante acerca de la transición energética. Ofrecemos un análisis en tres partes que resignifica la crisis climática dentro de su contexto más amplio de sobrepasamiento<sup>1</sup> ecológico, destaca numerosos problemas que resultan fatales colectivamente de las tecnologías energéticas denominadas *renovables* y sugiere soluciones alternativas que implican una contracción de la empresa humana<sup>2</sup>. Este análisis deja claro que la noción simplista de "energía limpia asequible" ve el mundo a través de un estrecho ojo de la cerradura que es ciego a los innumerables costes económicos, ecológicos y sociales. Estas "externalidades" indeseables no se pueden seguir ignorando. Para lograr la sostenibilidad y salvar lo que podamos<sup>3</sup> de la civilización, la sociedad debe embarcarse en un descenso planificado y cooperativo desde un estado extremo de sobrepasamiento en apenas una o dos décadas. Aunque para el proverbial camello sea más fácil pasar por el ojo de una aguja<sup>4</sup> que para la sociedad mundial tener éxito en este empeño, la historia está repleta de logros estelares que únicamente se han podido lograr a través de una tenaz búsqueda de lo aparentemente imposible.

**Palabras clave:** energías renovables; transición energética; sobrepasamiento; rebasamiento; *overshoot*; biocapacidad; límites ecológicos; justicia social; sostenibilidad

## 1. Introducción

Comenzamos recordando que los seres humanos somos narradores por naturaleza. Construimos socialmente complejos conjuntos de hechos, creencias y valores que guían nuestra forma de actuar en el mundo. De hecho, los seres humanos actuamos a partir de relatos que construimos socialmente como si fueran reales. Todas las ideologías políticas, las doctrinas religiosas, los paradigmas económicos, los relatos culturales —incluso las teorías científicas— son "historias" construidas socialmente que pueden o no reflejar con

1 N. de los T.: *Overshoot* en el original. También se suele traducir en castellano como *rebasamiento*. (El resto de las notas al pie, son también de la traducción, aunque no se indique.)

2 *Human enterprise*, en el original, que cabría traducir también como (el conjunto de todas) *las actividades humanas*.

3 En el original, *salvage civilization*. El verbo *to salvage* no tiene una traducción directa al castellano, y se suele emplear en inglés en el sentido de rescatar algo de más o menos valor de un accidente, de un naufragio o de un estado inservible para poder reutilizarlo (recuperar, restaurar), y por tanto tiene un significado diferente a *to save* (*salvar*). De hecho posee una clara connotación de residuo, chatarra o restos reaprovechables y así se habla, por ejemplo, de *salvage cars* de manera similar a nuestras declaraciones de  *siniestro total* en las compañías de seguros. Cabe entender, pues, que los autores, más que de *salvar* este modelo civilizatorio actual, están hablando de salvar los trastos y rescatar del naufragio algunos elementos útiles de eso que venimos llamando históricamente *la Civilización*, con mayúscula.

4 La referencia bíblica está en Mateo 19:24, donde Jesús afirma que "es más fácil que un camello pase por el ojo de una aguja, que un rico entre en el Reino de los Cielos".

exactitud cualquier aspecto de la realidad que pretendan representar. Una vez que una construcción concreta se ha impuesto, es probable que sus partidarios la traten con más seriedad que las pruebas opuestas de un marco conceptual alternativo.

El *Green New Deal* (GND) es el principal camino al que aspiramos en la narrativa dominante para lograr una sostenibilidad ecológica socialmente justa. Su mensaje central es que una transición suave para abandonar los combustibles fósiles hostiles para el clima es una cuestión tecnológica relativamente sencilla. Sus defensores no sólo afirman que la electrificación de todo el consumo de energía mediante turbinas eólicas y paneles solares fotovoltaicos de alta tecnología es técnicamente posible, sino que una sustitución tan amplia y sin precedentes de la arraigada base energética de la sociedad es viable desde el punto de vista financiero y conlleva la ventaja añadida de crear miles de empleos "verdes" [1-7]. El único ingrediente que falta, nos dicen, es la voluntad política. Los planes de transición energética elaborados por numerosas instituciones académicas e investigadores de todo el mundo apoyan o se ajustan obedientemente al paradigma del GND, y los políticos de todo el mundo han adoptado la bandera del GND como núcleo de sus promesas medioambientales.

Nosotros sostenemos que, aunque la narrativa del GND es muy seductora, es poco más que una desastrosa ilusión compartida. No sólo es técnicamente defectuosa, sino que no reconoce que la disfunción ecológica humana es el motor general del incipiente colapso sistémico mundial.

Al considerar el cambio climático, y no el sobrepasamiento ecológico —del que el cambio climático es tan sólo un síntoma— como el problema central, el GND y sus variantes se aferran en vano a las soluciones tecnoindustriales para los problemas causados por la sociedad tecnoindustrial. Esta búsqueda autorreferencial está condenada al fracaso. Como supuestamente dijo Albert Einstein, "no podemos resolver nuestros problemas con el mismo pensamiento que utilizamos cuando los creamos". Necesitamos una narrativa completamente nueva para una transición energética exitosa. Sólo si abandonamos la fuente paradigmática defectuosa de nuestro dilema ecológico podremos formular vías realistas para evitar el colapso socio-ecológico.

## **2. El cambio climático en el contexto del sobrepasamiento**

Los llamamientos que desde hace mucho tiempo la ecología y desde el ecologismo más informado vienen haciendo para que la sociedad adopte una perspectiva sistémica y emplee un enfoque multidisciplinar del cambio climático antropogénico han caído en saco roto. La mayoría de la gente ha sucumbido al paradigma mecanicista-reduccionista que ha

dominado la ciencia cartesiana, como demuestra el aislamiento del clima de su contexto ecológico más amplio y su tratamiento como una variable discreta e independiente. La realidad es que el cambio climático es sólo un síntoma de la desestabilización de los sistemas, ya que la empresa humana ha llegado a desbordar la ecosfera.

Para recalibrar nuestra lente focal, consideremos los siguientes cambios acelerados. La población de *H. sapiens* es casi ocho veces mayor que al comienzo de la Era Industrial impulsada por los combustibles fósiles, hace apenas 200 años, y ha crecido casi 20 veces más rápido [8]. Para dar cabida a la explosión de la humanidad, más de la mitad de la superficie terrestre de la Tierra se ha modificado sustancialmente, sobre todo para la agricultura (la más destructiva de las tecnologías desde el punto de vista ecológico). Una de las consecuencias es el desplazamiento competitivo de las especies no humanas de sus hábitats y fuentes de alimento. Antes de la aparición de la agricultura, hace entre ocho y diez milenios, los humanos representaban menos del 1% y los mamíferos salvajes el 99%, de la biomasa de mamíferos de la Tierra. Hoy en día, el *H. sapiens* constituye el 36% y nuestro ganado doméstico otro 60%, de una biomasa de mamíferos muy ampliada, en comparación con sólo el 4% de todas las especies silvestres combinadas [9-11]. McRae *et al.* [12] estiman que las poblaciones de especies de vertebrados no humanos disminuyeron un 58% sólo entre 1970 y 2012. Las poblaciones de vertebrados de agua dulce, marinos y terrestres se redujeron en un 81%, 36% y 38% respectivamente, y las de invertebrados en un 50%.

Mientras que los combustibles fósiles (CF) —carbón y, posteriormente, petróleo y gas natural— han sido la principal fuente de energía de la humanidad durante los dos últimos siglos, y el 50% de todos los combustibles fósiles quemados en la historia se han consumido sólo en los últimos 30 años (hasta el 90% desde principios de la década de 1940) a medida que se ha ido afianzando el crecimiento superexponencial [13,14]. Por tanto, no debería sorprender que las emisiones de dióxido de carbono —el principal subproducto material de la combustión de combustibles fósiles y el principal motor antropogénico del cambio climático— hayan superado durante mucho tiempo la absorción fotosintética de las plantas verdes. En 1997 (cuando el consumo anual era un 40% menor que en 2021), la humanidad ya quemaba cada año combustibles fósiles que contenían unas 422 veces la cantidad neta de carbono fijada por la fotosíntesis en todo el mundo [15]. Entre 1800 y 2021, las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera aumentaron un 48%, pasando de 280 ppm a aproximadamente 415 ppm.

Estos datos demuestran que la caída de la biodiversidad y el cambio climático, junto con la contaminación del aire, la tierra y los océanos, la deforestación, la desertificación, la incipiente escasez de recursos, etc., son las consecuencias inevitables —de hecho, síntomas paralelos— del mismo fenómeno de fondo: el espectacular y continuo crecimiento de la empresa humana en un planeta finito. El *H. sapiens* está en

sobrepasamiento, explotando los ecosistemas más allá de sus capacidades de regeneración y asimilación. El sobrepasamiento sólo es posible gracias a: (a) la disponibilidad a corto plazo de prodigiosas reservas de formas renovables (peces, bosques, suelos, etc.) y no renovables (carbón, petróleo, gas natural, etc.) del llamado "capital natural"; y (b) los enormes, pero finitos, procesos naturales de asimilación y reciclaje de residuos de la ecosfera. Sin embargo, se avecina un ajuste de cuentas. En apenas unas décadas de crecimiento geométrico de la población y de la economía, los seres humanos han explotado (a menudo hasta el colapso) las reservas de capital natural que tardaron milenios en acumularse y han obstaculizado los procesos naturales de apoyo a la vida mediante vertidos excesivos, a menudo tóxicos. La empresa humana utiliza ahora las capacidades bioproductivas y de asimilación de 1,75 equivalentes de la Tierra [16]. En términos sencillos, el atolladero ecológico del mundo industrial es el resultado de que demasiadas personas consumen demasiado y contaminan en exceso la ecosfera.

Está claro que la crisis climática no puede resolverse aisladamente del macroproblema del sobrepasamiento, y menos aun utilizando tecnologías que dependen de los mismos combustibles fósiles y procesos ecológicamente destructivos que crearon el problema en primer lugar.

### 3. Problemas de las llamadas energías renovables

Aquí examinamos de forma integral las energías renovables (ER), centrándonos en las limitaciones, ampliamente ignoradas, de las tecnologías de energías renovables que se suelen presentar como soluciones (pero que no constituyen todas las opciones posibles de energías renovables). Este examen muestra que las energías renovables no pueden suministrar la misma cantidad y calidad de energía que los CF, que las tecnologías propuestas no son renovables, que su producción —desde la extracción hasta la instalación— es intensiva en energía fósil y que su producción —especialmente la extracción de sus metales y el desecho de sus residuos— conlleva atroces injusticias sociales y una importante degradación ecológica.

El reto que tenemos ante nosotros es identificar qué tecnologías de ER son sostenibles y viables. La *sostenibilidad* implica la capacidad de persistir a perpetuidad con un mínimo impacto ambiental negativo (es decir, dentro de los límites ecológicos). La *viabilidad* implica cuestiones básicas y prácticas de producción y aplicación (por ejemplo, ¿es posible construir y aplicar la tecnología de ER sin insumos de CF? ¿Puede hacerse en un plazo relevante para el clima? ¿Es asequible?). En este contexto, hay que descartar eslóganes como "energía 100% limpia" y "emisiones netas cero". Todas las tecnologías de producción de energía, por muy rudimentarias o avanzadas que sean, utilizan insumos del medio ambiente y producen contaminación u otro tipo de degradación ecológica a lo largo de su ciclo de vida. Hay que evaluar hasta qué punto esto compensa. El hecho de que la

luz solar y el viento sean flujos de energía "limpios" y continuos no significa que su aprovechamiento para realizar un trabajo lo sea. Aunque inevitablemente nos enfrentamos a un futuro sustentado totalmente en las ER, la cuestión no es cómo satisfacer la demanda total actual, sino determinar (a) qué tecnologías de ER son realmente sostenibles y viables; (b) los contextos en los que podrían serlo, incluidos los usos prioritarios a los que podrían aplicarse; y (c) cómo reducir la demanda energética de forma eficaz y justa.

Los defensores del GND son tremendamente tolerantes con lo inexplicable. No abordan la cuestión de cómo las gigatoneladas de metales y minerales ya muy agotados, esenciales para la construcción de las denominadas *tecnologías de energías renovables*, estarán disponibles a perpetuidad, teniendo en cuenta la vida útil típica de cinco a 30 años y la necesidad de una sustitución continua [17-19]. No ofrecen soluciones viables para el daño ecológico y las deplorables condiciones de trabajo, a menudo en el Sur Global, que implica la extracción de minerales metálicos [20,21]. Los Green New Deals (GNDs) no proponen soluciones viables (técnicas o financieras) para electrificar los numerosos procesos de fabricación de alta intensidad calorífica que implica la construcción de turbinas eólicas y paneles solares de alta tecnología (por no mencionar todos los demás productos de la sociedad moderna) [22-25]. Los flujos de residuos generados por las llamadas energías renovables al final de su corta vida útil se ignoran o se asume que serán tratados eventualmente por procesos de reciclaje aún inexistentes [26-28]. Las propuestas para electrificar el 80% de la demanda de energía no eléctrica pasan por alto hechos cruciales, como que los sistemas de transmisión y las redes a escala nacional necesarios para el transporte terrestre electrificado ni siquiera existen hoy en día, ni es probable que se construyan debido a las limitaciones materiales, energéticas y financieras [29].

Por último, como se ha subrayado anteriormente, la búsqueda de una fuente mágica de energía gratuita ignora la crisis de sobrepasamiento que, paradójicamente, ha sido posible gracias a la energía fósil abundante y barata. Sostenemos que la única respuesta viable al sobrepasamiento es una contracción gestionada de la empresa humana hasta que llegemos al territorio estable y seguro definido por los límites ecológicos. Esto implica que muchas menos personas deberán consumir mucha menos energía y recursos materiales que en la actualidad.

Obviamente, un descenso controlado requerirá un cambio de paradigma en los valores, creencias y supuestos socialmente construidos de la sociedad. Como mínimo, debemos sustituir nuestro implacable antropocentrismo y nuestro enfoque estrictamente instrumental de la Naturaleza por una perspectiva más holística y ecocéntrica. Las personas deben reconocer tanto su total dependencia de la integridad de la ecosfera como el valor intrínseco de otras especies y ecosistemas naturales. Esto significa superar la adicción del capitalismo al crecimiento material y adoptar sistemas compatibles con la vida en un único planeta Tierra para todos. "Una única Tierra para que vivamos todos"<sup>5</sup> quiere decir un nivel de vida material que, si se extendiera a todos los habitantes de la Tierra, sería sostenible, es decir, la población humana viviría dentro de la capacidad de carga global [30]. Evidentemente, cuantas más personas haya, menor será el nivel de vida medio sostenible.

5 *One-Earth living*, en el original. Es un concepto que se repetirá más adelante.

Lejos de fomentar un paradigma tan radicalmente nuevo, el GND promueve una versión eco-lavada del *statu quo* con su fe incuestionable en que la tecnología nos salvará y su narrativa reconfortante de que es posible continuar como siempre, pero con medios alternativos. Este mito ha sido tan bien aceptado por el público y el mundo académico que cuestionarlo es percibirlo como estar en contra de lo renovable, como un desprecio pesimista del ingenio humano, o incluso como un apoyo a la industria de los CF. Aquellos que se aventuran a hacer observaciones críticas suelen hacerlo cohibidos y turbados.

La siguiente visión eco-heterodoxa de la transición de las energías renovables surge de nuestro compromiso con el discurso crítico y con la gestión responsable de nuestro único planeta. Esta perspectiva amplía la lente de análisis y confronta realidades desnudas que ya no pueden ser ignoradas. Nuestro objetivo primordial es ayudar a la sociedad a desarrollar una apreciación meditada de lo que podría ser un panorama energético verdaderamente renovable.

### **3.1. La cuestión de la electrificación**

Sólo el 19% del consumo mundial de energía final es en forma de electricidad. El otro 81% es en forma de combustible líquido [31]. Existen obstáculos formidables para convertir simplemente el consumo de electricidad a las llamadas fuentes renovables.

#### **3.1.1. Comprobación de la validez de la visión general**

La transición del suministro eléctrico de EE. UU. para liberarlo de los combustibles fósiles en 2050 requeriría un ritmo de construcción de redes 14 veces superior al del último medio siglo [32]. Los costes reales de instalación de un programa solar mundial habrían ascendido a unos 252 billones de dólares (unas 13 veces el PIB de EE. UU.) hace una década [33], y serían bastante más en la actualidad. Un informe reciente que describe lo que se necesitaría para lograr la "descarbonización" y la electrificación del 90% en 2035 olvida mencionar que, para cumplir esos objetivos, Estados Unidos tendría que cuadruplicar la construcción de turbinas eólicas del pasado año, cada año durante los próximos 15, y triplicar cada año en ese mismo plazo la construcción realizada este último año de sistemas de energía solar fotovoltaica, y repetir el proceso indefinidamente, ya que los paneles solares y las turbinas eólicas tienen una vida media de entre 15 y 30 años [34,35]. Además, Clack *et al.* [36] descubrieron que uno de los estudios más citados sobre la electrificación al 100% en Estados Unidos es propenso a errores y está cargado de supuestos insostenibles.

#### **3.1.2. Calor para la fabricación**

Los procesos de fabricación que se utilizan hoy en día para hacer paneles solares, turbinas eólicas de alta tecnología, baterías y todos los demás productos industriales exigen temperaturas muy elevadas que actualmente se generan utilizando CF. A pesar de la importancia crítica del calor en la fabricación, hay poca información sobre si se puede generar, o cómo, sólo con ER.

Aproximadamente el 30% de las aplicaciones de calefacción industrial requieren temperaturas inferiores a 100 °C (212 °F); el 27% pueden satisfacerse con temperaturas entre 100 y 400 °C (212-750 °F); y el 43% requieren temperaturas superiores a 400 °C (750 °F) [37]. La mayoría de las tecnologías de calefacción de ER existentes únicamente pueden suministrar calor dentro de la categoría de temperatura más baja [37]. Esto es muy problemático, ya que la fabricación de paneles solares requiere temperaturas que oscilan entre los 1.480 y los 1.980 °C (2.700 °F) y la fabricación de acero y cemento para turbinas eólicas de alta tecnología, centrales hidroeléctricas y centrales nucleares requiere temperaturas que oscilan entre los 980 y los 1.700 °C (1.800-3.100 °F).

Según la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA) [38], el gas natural, el petróleo, la electricidad y el carbón son las fuentes actuales de energía industrial, siendo el gas natural y el petróleo los predominantes. Para que la fabricación industrial moderna —responsable de la generación de los aparentemente innumerables componentes de las denominadas tecnologías de ER— continúe sin los CF, es necesario desarrollar tecnologías basadas en las energías renovables que suministren sustitutos sin fisuras a las fuentes de energía de alto calor a unos costes económicos y ecológicos aceptables.

Los informes existentes exploran numerosas fuentes de calor de ER para la fabricación, incluyendo varias formas de bioenergía, energía solar concentrada (CSP), hidrógeno, geotérmica y nuclear [22-25]. En este artículo se analiza cada una de ellas en relación con las fuentes de energía fósiles que podrían sustituir.

Los posibles sustitutos del gas natural son el biometano y el hidrógeno. El biometano es una fuente casi pura de metano derivada de uno de los dos métodos siguientes: la depuración del biogás<sup>6</sup> o la biomasa leñosa gasificada. El biogás es una mezcla de gases que resulta de la descomposición de los residuos agrícolas, ganaderos y domésticos; de las aguas residuales en las plantas de tratamiento de aguas residuales; y de los residuos municipales (es decir, la digestión anaeróbica de la materia orgánica en un entorno sin oxígeno). La gasificación consiste en calentar la madera en un entorno con poco oxígeno para producir gas sintético o *syngas*.<sup>7</sup> El proceso de mejora implica la eliminación de casi todos los gases del biogás y el *syngas*, excepto el metano.

El biometano como opción de sustitución de la energía industrial presenta numerosos problemas. En la actualidad, la depuración del biogás representa aproximadamente el 90% de toda la producción de biometano [39]. Desde un punto de vista tecnológico, los cinco

6 El término en inglés es *biogas upgrading*. Podría traducirse también como concentración.

7 El gasógeno, ampliamente usado en diversos países durante la Segunda Guerra Mundial por la escasez de petróleo, sería un tipo de gas sintético. Aún se utiliza como combustible para vehículos en países como Corea del Norte, China o Rusia.

procesos comercialmente viables para la concentración del biogás tienen desventajas, si no auténticos obstáculos, que limitan su producción y viabilidad. El polietilenglicol utilizado en un tipo de depuración física<sup>8</sup> es un derivado del petróleo, y la otra forma de depuración física basada en el agua requiere cantidades significativas de agua y electricidad [40,41]. La depuración química implica disolventes tóxicos que son costosos y difíciles de manejar, y una gran demanda de calor [40-42]. A pesar de los bajos insumos energéticos y financieros [40], la separación por membranas implica membranas frágiles y de corta vida (que duran entre 5 y 10 años) [42] y produce una pureza de metano relativamente baja [40]. La adsorción por cambio de presión<sup>9</sup> es un proceso muy complejo [40,42], y ni la separación criogénica ni los métodos biológicos son todavía comercialmente viables [42,43]. Además, no todas las tecnologías de mejora son autosuficientes desde el punto de vista energético; muchas, si no la mayoría, dependen de los combustibles fósiles [41]. El problema es que la depuración del biogás produce CO<sub>2</sub> [40,41]. La captura y el almacenamiento de carbono es una propuesta para tratar el CO<sub>2</sub> resultante, pero presenta problemas ecológicos y costes elevados [40]. La gasificación aún no se ha implantado a gran escala industrial [43].

Existen problemas adicionales relacionados con las materias primas y los requisitos de ubicación. Los flujos de residuos actuales son insuficientes para apoyar el uso generalizado del biometano en el sector del transporte, por no hablar del sector industrial [44]. Se calcula que la máxima contribución práctica del biometano a través del biogás y la gasificación es sólo de alrededor del 11% del consumo total de gas natural en Europa [43]. La recolección de biomasa leñosa para su gasificación tendría que considerarse juiciosamente en el contexto más amplio de su gestión sostenible. Teniendo en cuenta las limitaciones de transporte posteriores a la FV que se comentan más adelante, las instalaciones de producción de biometano tendrían que estar ubicadas junto a los centros de materia prima, que a su vez tendrían que estar ubicados junto a los centros de fabricación. Estos requisitos plantean retos evidentes, si no auténticos bloqueos.

El mayor problema de la producción de hidrógeno es que, independientemente del método, se necesita más energía para producir y comprimir el producto que la que puede generar posteriormente [22,25,29,33]. La única materia prima viable a gran escala para el hidrógeno es el gas natural, y el proceso de reformado del gas requiere temperaturas que van de los 700 a 1.000 °C (1.300-1.830 °F) [25,29,33,45]. El reformado de gas produce importantes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y presenta numerosos problemas de fugas, corrosión y combustión accidental [22,25,45].

Entre los posibles sustitutos del petróleo (crudo) se encuentran el bioetanol (etanol elaborado a partir de maíz u otras materias vegetales fermentadas) y el biodiésel. Como

8 *Physical scrubbing.*

9 *Pressure swing adsorption.*

se explica más adelante, las necesidades de tierra para alimentar a más de 8.000 millones de personas sin insumos de combustibles fósiles impiden el uso a gran escala de tierras de cultivo y biomasa vegetal con fines energéticos, incluso si la energía neta fuera satisfactoria.

Los candidatos para la electricidad no fósil son la geotermia, la energía nuclear, la energía solar concentrada (CSP), la energía solar fotovoltaica y las turbinas eólicas. Los sistemas geotérmicos producen temperaturas de tan sólo 150 °C (300 °F) y deben estar situados en regiones montañosas con movimientos activos de las placas tectónicas o cerca de puntos calientes volcánicos [24]. Los pozos de producción suelen tener hasta dos kilómetros de profundidad [23,24], profundidades que sólo pueden alcanzarse con maquinaria alimentada por combustibles fósiles y tecnologías avanzadas.

Como se explica más adelante, la energía nuclear tiene enormes necesidades de agua y otros materiales. Las instalaciones no pueden construirse ni mantenerse sin maquinaria alimentada por combustibles fósiles y existe el problema aún no resuelto de la eliminación de los peligrosos residuos radiactivos. Los tan anunciados pequeños reactores modulares (SMR) están todavía en fase de I+D, siguen generando subproductos radiactivos que deben ser eliminados y plantean el problema de la transportabilidad.

A pesar de que los límites máximos teóricos de temperatura van de 1.000 a 1.200 °C (1.800-2.200 °F), los sistemas CSP existentes generan calor en un rango de sólo 150 a 300 °C (300-570 °F) [22,24]. Las centrales CSP suelen costar más de mil millones de dólares y requieren unos ocho kilómetros cuadrados de terreno. Aunque pueden almacenar energía térmica en sales fundidas, la sal *in situ* almacena menos de un día de suministro eléctrico y casi todas las centrales CSP tienen un respaldo fósil para disminuir las pérdidas térmicas por la noche, evitar que la sal fundida se congele, complementar la baja irradiación solar en invierno y para los arranques rápidos por la mañana [22,29].

La electricidad en corriente continua generada por la energía eólica y la solar fotovoltaica sólo puede almacenarse en baterías, lo que plantea graves problemas ecológicos y prácticos, como se verá más adelante.

El único sustituto potencial del carbón (mineral) es el carbón vegetal derivado de la madera. Esto plantea dos problemas evidentes. Las reservas restantes de biomasa leñosa, enormemente mermadas durante la Era Industrial, no están en absoluto a la altura de las necesidades actuales de fabricación, sobre todo teniendo en cuenta la necesidad de reservar la mitad de las principales ecorregiones de la Tierra para garantizar la integridad funcional y la salud de la ecosfera [46]. Incluso si el suministro sostenible de un recurso renovable ya escaso no fuera una preocupación, los hornos/calderas industriales y los equipos de fabricación de acero están específicamente diseñados para funcionar con

carbón térmico y coque (hecho mediante destilación de carbón bituminoso); el cambio al carbón vegetal requeriría el rediseño y la reconstrucción de sistemas enteros.

Estos obstáculos impiden la electrificación de todos los procesos industriales de fabricación que no utilizan ya electricidad. Aun así, la I+D sobre opciones de electrificación masiva ha sido escasa. Además, dado que la mayoría de los equipos actuales alimentados con combustibles fósiles requerirían complejos rediseños de sistemas a gran escala, la electrificación del 100% de los procesos fabriles sería extremadamente difícil, si no inasumiblemente cara [25].

En resumen, ninguna fuente o sistema de ER es viable si no puede generar suficiente energía tanto para levantarse a sí misma (literalmente desde el suelo) como para suministrar un excedente suficiente para el consumo final de la sociedad. En la actualidad, ninguna de las llamadas tecnologías de energías renovables tiene nada que hacer con estas condiciones.

### **3.1.3. Problemas de los paneles solares**

La fabricación de paneles solares utiliza sustancias tóxicas, grandes cantidades de energía y agua, y genera subproductos tóxicos [33,47]. Los paneles solares monocristalinos y policristalinos requieren altas temperaturas en cada paso de su producción. Por ejemplo, se necesitan temperaturas de 1. 500 a 2.000 °C (2.700-3.600 °F) para transformar el dióxido de silicio en silicio de calidad metalúrgica. Hasta la mitad del silicio se pierde en el proceso de aserrado de las obleas. Por cada MW de paneles solares producidos, se utilizan alrededor de 1,4 toneladas de sustancias tóxicas (incluyendo ácido clorhídrico, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, ácido nítrico y fluoruro de hidrógeno) y 2.868 toneladas de agua, al tiempo que se liberan 8,6 toneladas de emisiones, 8,1 toneladas de las cuales son los compuestos perfluorados hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), trifluoruro de nitrógeno (NF<sub>3</sub>) y hexafluoroetano (C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>), que son miles de veces más potentes que el CO<sub>2</sub> [48]. También se generan otros subproductos tóxicos, como el gas triclorosilano, el tetracloruro de silicio y partículas peligrosas procedentes del proceso de aserrado de las obleas. Los paneles solares amorfos (de película fina) se fabrican con cadmio, que es carcinógeno y actúa como genotoxina.

El rendimiento real de los paneles solares instalados es problemático [33,49,50]. Los índices de eficiencia de los paneles solares son bajos (una media de entre el 15% y el 20%) y casi siempre inferiores a lo que anuncian los fabricantes. Los paneles solares son muy sensibles y pierden funcionalidad en condiciones no óptimas (por ejemplo, cuando hay neblina o humedad, si los paneles no están bien inclinados o si algún obstáculo — como excrementos de pájaros, polvo, nieve o contaminación— bloquea incluso pequeñas partes de la superficie del panel). A medida que envejecen, pierden eficacia, a veces hasta un 50%.

Los paneles solares tienen una vida útil de sólo 20 a 30 años, lo que supone un enorme problema de gestión de residuos. Los inversores (que transforman la salida de corriente continua de los paneles solares en la entrada de corriente alterna que necesitan los aparatos) deben sustituirse cada cinco u ocho años [33]. A finales de 2016, había aproximadamente 250.000 toneladas de residuos electrónicos de paneles solares en todo el mundo, lo que representa alrededor del 0,5% de todos los residuos electrónicos anuales a nivel mundial [26]. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) [51], los residuos de paneles solares podrían ascender a seis millones de toneladas anuales en 2050 y los acumulados para entonces podrían alcanzar los 78 millones de toneladas. En 2050, los paneles solares muertos podrían representar el 10% de todos los flujos de residuos electrónicos y sus residuos acumulados al final de su vida útil podrían ser mayores que todos los residuos electrónicos de 2018 [20]. La tan cacareada *bala de plata* del reciclaje no es la panacea que se pretende. El reciclaje requiere grandes cantidades de energía, agua y otros insumos, y expone a los trabajadores a materiales tóxicos que deben ser eliminados. En la actualidad, sólo hay dos tipos de reciclaje de energía solar fotovoltaica disponibles comercialmente y sólo un puñado de instalaciones de reciclaje en todo el mundo [26,27].

Incluso sin estos inconvenientes, la energía solar fotovoltaica tiene un bajo rendimiento energético de la energía invertida (Tasa de Retorno Energético, TRE<sup>10</sup>), demasiado bajo para alimentar la civilización moderna [52-55].

#### **3.1.4. Problemas de las baterías y otros almacenamientos**

Hay cuatro tipos principales de almacenamiento de energía a escala de la red, probados comercialmente: el almacenamiento hidroeléctrico por bombeo, el almacenamiento de energía por aire comprimido, el almacenamiento en baterías avanzadas y el de volante de inercia. El almacenamiento hidroeléctrico por bombeo sólo es posible si las presas hidroeléctricas forman parte del sistema. El almacenamiento de energía con volante de inercia se utiliza más para la gestión de la energía que para el almacenamiento de energía a largo plazo. De los dos restantes, el almacenamiento en aire comprimido sólo está implantado en dos centrales eléctricas en el mundo y es probable que tenga poca expansión, ya que es bastante ineficiente y depende de grandes cavidades subterráneas con características geológicas específicas [29,56,57]. En Estados Unidos sólo hay unas pocas centrales eléctricas con almacenamiento en baterías, que representan 800 MW de capacidad energética [56,58]. Hay que tener en cuenta que Estados Unidos consume unos 4000 TW-h de electricidad al año [59], es decir, 563 veces la capacidad de almacenamiento en baterías existente.

10 En inglés, *EROI* o *EROEI*.

Un año entero de producción de la mayor instalación de fabricación de baterías de iones de litio del mundo —la gigafactoría de 5.000 millones de dólares de Tesla en Nevada— podría almacenar solo tres minutos de la demanda anual de electricidad de Estados Unidos [32]. La fabricación de una cantidad de baterías que pudiera almacenar solo el valor de dos días de la demanda de electricidad de Estados Unidos requeriría 1.000 años de producción en esta gigafactoría [32]. Almacenar en baterías de litio sólo el valor de 24 horas de generación eléctrica de Estados Unidos costaría 11,9 billones de dólares, ocuparía 893 Km<sup>2</sup> y pesaría 74 millones de toneladas [29], con un enorme coste ecológico. Un futuro centrado en las baterías implica la extracción de gigatoneladas de minerales de tierras raras. Por cada kilogramo de batería hay que extraer, transportar y procesar entre 50 y 100 kg de mineral [60]. Construir suficientes baterías de litio para almacenar sólo 12 horas de consumo diario de energía requeriría 18 meses de producción mundial de energía primaria y todo el suministro mundial de varios minerales [29].

La química de las baterías es compleja y las mejoras en una característica (por ejemplo, la densidad energética, la capacidad de potencia, la durabilidad, la seguridad o el coste) siempre implican un coste en otra. Los sistemas de control y refrigeración, así como el acero utilizado para recubrir el litio inflamable (otros tipos de baterías también lo son) pesan 1,5 veces más que la propia batería [29]. Las baterías pierden capacidad con el tiempo, se ven afectadas negativamente por las temperaturas extremas, plantean problemas de seguridad que no tienen los motores de combustión interna [61] y tienen una mala relación energía-peso [62]. Además, las baterías emiten más gases de efecto invernadero que los motores de combustión interna [63].

No todos los vehículos y maquinaria que se utilizan hoy en día pueden funcionar con baterías. Las grúas pequeñas, una grúa sobre orugas [64], los equipos de construcción ligeros y algunos pesados, así como los turismos pueden funcionar con baterías. Sin embargo, otras grúas de gran tamaño (utilizadas para cargar y descargar mercancías y en grandes proyectos de construcción, operaciones mineras, etc.), los cargueros y otros barcos de gran tamaño, los aviones y los camiones de gran tonelaje no pueden hacerlo [29,60]. Sripad y Viswanathan [65] llegaron a la conclusión de que el concepto de vehículo Semi de Tesla es técnicamente inviable dada la tecnología actual de baterías de iones de litio y es probablemente prohibitivo desde el punto de vista financiero. Elon Musk, consejero delegado de Tesla, declaró a principios de 2021 que la producción estaba en suspenso debido a la falta de disponibilidad de células de batería y a la falta de rentabilidad [66].

Las baterías tienen una vida útil de entre 5 y 15 años, lo que crea un importante problema adicional de gestión de residuos [20]. No pueden eliminarse en los vertederos debido a su toxicidad y son uno de los elementos que más rápido crecen en los flujos de residuos electrónicos. Sólo el 5% de las baterías de litio se reciclan.

### 3.1.5. Problemas de la energía eólica

Los grandes aerogeneradores metálicos que se han hecho omnipresentes hoy en día están compuestos principalmente por torres de acero, góndolas y palas de fibra de vidrio, y generadores y cajas de engranajes multielementos que contienen grandes cantidades de acero (hierro) y cobre. Aproximadamente el 25% de las grandes turbinas eólicas utilizan generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG), tecnología de última generación que emplea las tierras raras metálicas siguientes: neodimio (Nd), praseodimio (Pr), disprosio (Dy) y terbio (Tb). El 75% restante de los aerogeneradores en funcionamiento utilizan algún tipo de generador magnético convencional. Se espera que el empleo de los PMSG crezca dadas sus ventajas posteriores a la implantación [67].

La producción de acero depende del carbón. El acero es una aleación de hierro y carbono, este último aportado por el carbón metalúrgico o de coque. La producción de coque a partir de carbón metalúrgico requiere temperaturas de unos 1.000 °C (1.800 °F). Así, la combinación de coque y hierro para fabricar acero requiere altos hornos a temperaturas de 1.700 °C (3.100 °F). Por término medio, se emiten 1,85 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de acero producida [25].

La extracción y el procesamiento de los metales conocidos como *tierras raras* y que en la actualidad son comunes en la mayoría de las turbinas eólicas, producen importantes residuos tóxicos. Muchas de estas tierras raras están ligadas a depósitos de mineral que contienen torio y uranio, ambos radiactivos [68]. El ácido sulfúrico se utiliza para separar las tierras raras del mineral, exponiendo el residuo radiactivo y produciendo ácido fluorhídrico, dióxido de azufre y aguas residuales ácidas [68,69]. Se produce una tonelada de residuos radiactivos por cada tonelada de tierras raras extraída. El procesamiento de tierras raras para turbinas eólicas ya genera tantos residuos radiactivos como la industria nuclear [69].

Un aerogenerador típico de 3 MW pesa entre 430 y 1.200 toneladas [70]. Todos los componentes deben ser transportados por grandes camiones desde la fábrica hasta los lugares de instalación y, una vez allí, ser montados con enormes grúas. Como ya se ha explicado, ni los camiones pesados ni las grúas pueden funcionar todavía con baterías. Como se mostrará más adelante, la electrificación del transporte de mercancías según el calendario del Acuerdo de París (~50% de reducción de emisiones para 2030) es improbable, si no imposible.

Para fijar la torre al suelo se necesitan enormes bases de hormigón, que a menudo requieren más de 1.000 toneladas de hormigón y barras de acero, y que miden entre 9 y 15 metros de ancho y entre 1,8 y 9 metros de profundidad. Para excavar el terreno se necesita maquinaria fósil de gran potencia. El cemento, que es el principal ingrediente del hormigón, se produce en hornos industriales que se calientan a 1.500 °C (2.700 °F). Se

emite al menos una tonelada de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de cemento producida [71], y el cemento debe transportarse en camiones alimentados con combustibles fósiles hasta el lugar de instalación.

Un aerogenerador de 3,1 MW genera entre 772 y 1.807 toneladas de residuos en vertederos, entre 40 y 85 toneladas de residuos enviados a incineración y unas 7,3 toneladas de residuos electrónicos [20]. Las palas de los aerogeneradores, fabricadas con materiales compuestos, son totalmente irreciclables en la actualidad [28]. Por último, aunque es superior a la energía solar fotovoltaica, ni la energía eólica terrestre ni la marina tienen una TRE >3:1, muy por debajo de lo necesario para sostener la civilización moderna [52].

### **3.1.6. Impactos ecológicos de la energía hidroeléctrica**

Las grandes presas hidroeléctricas tienen un enorme impacto ecológico [72]. Interrumpen el flujo de agua, degradan la calidad del agua, bloquean el transporte de nutrientes y sedimentos vitales, destruyen el hábitat de los peces y de la fauna silvestre, impiden la migración de los peces y de otras especies acuáticas y comprometen ciertas oportunidades recreativas. Los embalses ralentizan y ensanchan los ríos, haciendo que se calienten. Muchas presas no funcionan de forma eficiente, no cumplen las normas medioambientales, producen menos energía con el tiempo y necesitan reparaciones importantes [73-75].

### **3.1.7. Problemas de la energía nuclear**

Para satisfacer la demanda de energía primaria prevista para 2050 —suponiendo una reducción del 60% de las emisiones con respecto a los niveles de 2004— habría que construir aproximadamente 26.000 centrales nucleares de 1 GW. En la actualidad, el mundo cuenta con 449, muchas de las cuales se acercan al final de su vida útil y pronto se enfrentarán al desmantelamiento [76]. Dejando a un lado la TRE y los materiales para la construcción y el funcionamiento de las instalaciones, los enormes costes financieros, los plazos reglamentarios, la oposición social y los obstáculos para la eliminación de residuos hacen que la opción totalmente nuclear sea prácticamente imposible [76].

Sólo se han construido dos prototipos de reactores "intrínsecamente seguros" de cuarta generación, uno en China y otro en Rusia, pero aún queda mucho por hacer en materia de I+D y se prevé que su comercialización no se producirá hasta dentro de dos o tres décadas [77]. Aunque los reactores de cuarta generación utilizan el combustible de forma más eficiente y pueden incluso utilizar algunos residuos nucleares, las afirmaciones que se hacen sobre la gran reducción de residuos radiactivos son engañosas [78]. El enfoque limitado a la reducción de actínidos es irrelevante, ya que son otros subproductos de la fisión los que más preocupan desde el punto de vista de la seguridad a largo plazo. Además, el proceso de reprocesamiento del combustible para reducir las cantidades de

actínidos depende de requisitos tecnológicos excepcionales y genera en sí mismo residuos que deben ser eliminados.

Los reactores modulares pequeños (SMR) ofrecerían las ventajas de un menor tamaño y su transportabilidad, pero todavía están en fase de I+D y plantean dos problemas importantes [79]. Al igual que las grandes turbinas eólicas, los SMR necesitan ser transportados a largas distancias, lo que no es posible sin grandes camiones y grúas de combustible fósil. Además, los SMR siguen produciendo los mismos residuos radiactivos que los grandes reactores [80].

El *santo grial* de la fusión nuclear sigue estando plagado de problemas [81]. Para reproducir la fusión aquí en la Tierra, se necesitarían temperaturas de al menos 100 millones de grados Celsius, es decir, unas seis veces más calor que en el sol. El deuterio y el tritio, los combustibles disponibles para la fusión en la Tierra, son 24 órdenes de magnitud más reactivos que el hidrógeno ordinario que se quema en el sol, lo que implica una densidad de partículas mil millones de veces menor y un billón de veces peor confinamiento energético. En la fusión terrestre, las corrientes de neutrones energéticos constituyen el 80% de la producción de energía de las reacciones de deuterio-tritio (el único tipo de reacción potencialmente viable). Estos flujos de neutrones provocan que la energía de fusión sufra cuatro problemas: daños por radiación a las estructuras, residuos radiactivos, necesidad de blindaje biológico y posibilidad de producir plutonio apto para armas. Los reactores de fusión compartirían otros graves problemas que aquejan a los reactores de fisión: las enormes demandas de agua para la refrigeración; los drenajes parasitarios de energía que hacen que no sea rentable hacer funcionar una planta de fusión por debajo de los 1.000 MW; la liberación en el medio ambiente de tritio biológicamente peligroso y radiactivo; y los elevados costes de funcionamiento. Además, necesitan un combustible (tritio) que no se encuentra en la naturaleza y que sólo se genera en los reactores de fisión.

Las centrales nucleares no pueden construirse sin grandes grúas alimentadas con combustibles fósiles y enormes cantidades de hormigón, cuya producción, como se ha señalado, emite una cantidad importante de CO<sub>2</sub> y requiere altas temperaturas que actualmente no pueden generarse sin los CF.

### **3.1.8. La extracción de metales y sus injusticias sociales**

El paso a las tecnologías de ER aquí contempladas no haría más que aumentar la dependencia de la sociedad de los recursos no renovables, no sólo de los CF, sino también de más metales y minerales, añadiendo la explotación masiva de la geosfera a la sobreexplotación existente de la atmósfera [17]. Se prevé que la demanda de minerales aumente considerablemente hasta 2050. Hund *et al.* [18] prevén aumentos de hasta el 500% con respecto a los niveles de producción de 2018, en particular para los utilizados

en el almacenamiento de energía (por ejemplo, litio, grafito y cobalto), y un reciente informe de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) [82] estima que para alcanzar el "cero neto" a nivel mundial en 2050 se necesitaría una cantidad de recursos minerales seis veces superior a la actual. Esto supondría una cantidad de producción de metales —que requeriría una considerable combustión de CF— durante los próximos 15 años aproximadamente igual a la que existió desde el inicio de la humanidad hasta 2013 [17].

La explosión de la demanda ya está en marcha. Michaux [19] muestra que la extracción/consumo de minerales industriales ha aumentado un 144% entre 2000 y 2018; el consumo de metales preciosos ha aumentado un 40% y el de metales básicos un 96%. Sin embargo, tanto la tasa de descubrimiento de minerales como la ley de los minerales procesados están en franco declive. Michaux concluye que "las reservas mundiales no son lo suficientemente grandes como para suministrar suficientes metales para construir el sistema industrial de combustibles no fósiles renovables o satisfacer la demanda a largo plazo en el sistema actual". Evidentemente, sin avances extraordinarios en la tecnología de la minería y el refinado, el 10% del consumo mundial de energía que se utiliza actualmente para la extracción y el procesamiento de minerales aumentaría a medida que se explotasen los yacimientos más pobres y remotos [17].

Las injusticias sociales abundan en la producción de las actuales tecnologías de energía denominada *renovable*, complicando las demandas de justicia social en la transición energética. Gran parte de la extracción y el refinado de los componentes materiales de las llamadas energías renovables se lleva a cabo en los países en desarrollo y contribuye a la destrucción del medio ambiente, a la contaminación del aire y del agua y al riesgo de cáncer y defectos de nacimiento [20]. La mano de obra mal pagada suele ser la norma, así como la desigualdad de género y la subyugación y explotación de minorías étnicas y personas refugiadas [20]. La minería se basa a menudo en la explotación de niños, algunos de los cuales están expuestos a riesgos de muerte y lesiones, trabajan hasta la muerte en vertederos de chatarra electrónica o se ahogan en pozos anegados [20]. El acaparamiento de tierras y otras formas de conflicto y violencia se vinculan habitualmente a los esfuerzos de mitigación del cambio climático en todo el mundo [21]. En resumen, aunque lo que se suele denominar *tecnologías de energía renovable* pueden ofrecer condiciones más limpias en el punto de uso en el Norte Global, los costes ecológicos y los daños sociales sustanciales se han desplazado al Sur Global [20]. A medida que se intensifica la presión a favor de una energía y tecnología "verdes", estos daños se están extendiendo cada vez más hacia América del Norte y Europa [21].

### 3.1.9. Problemas del secuestro tecnológico del carbono

La captura y el almacenamiento de carbono (CCS<sup>11</sup>) y la captura directa en el aire (DAC) son mecanismos ampliamente anunciados para eliminar el carbono. Al igual que todas las

11 Siglas en inglés de *Carbon capture and storage*.

tecnologías denominadas *renovables*, ambas conllevan costes y problemas ocultos. La CCS presupone el uso continuado de los combustibles fósiles, lo que resulta problemático dado el rápido descenso de la TRE de dichos combustibles y la preocupación por el medio ambiente y la salud humana. Tanto la CCS como la DAC plantean problemas energéticos, ecológicos, de recursos y financieros. Durante su ciclo de vida, algunas tecnologías emiten más CO<sub>2</sub> del que capturan [83]. Capturar y secuestrar 1 Gt de carbono costaría unos 600.000 millones de dólares [84]. La mayor instalación de DAC del mundo sólo captura 4.000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, lo que supone 0,000004 Gt [83]. Actualmente se está diseñando una planta más grande, pero seguirá capturando sólo una Mt (0,001 Gt) de CO<sub>2</sub> al año [85]. Estas cantidades son minúsculas en comparación con lo que se necesita: el mundo emitió aproximadamente 38 Gt de CO<sub>2</sub> en 2019 [86]. Se necesitarían enormes cantidades de recursos naturales y de tierra para ampliar estas operaciones. El DAC "renovable" requeriría él solo toda la energía eólica y solar generada en Estados Unidos en 2018, y esto capturaría solo una décima parte de una Gt de CO<sub>2</sub> [83]. Los defensores de la CCS y la DAC también ignoran en gran medida sus impactos ecológicos, como el transporte, la inyección y el almacenamiento de CO<sub>2</sub> en la Tierra, así como la posible contaminación de las aguas subterráneas, los terremotos y las fugas de emisiones.

### **3.1.10. Subvención oculta de los combustibles fósiles**

Hoy en día, todas las tecnologías de energías llamadas renovables están subvencionadas por los combustibles fósiles durante todo su ciclo de vida. Los metales y otras materias primas se extraen y procesan con maquinaria a gran escala alimentada por petróleo. Estos metales y materias primas se transportan por todo el mundo en barcos de carga que queman combustible de caldera y en camiones que funcionan con diésel y que circulan por carreteras construidas con CF. Los procesos de fabricación utilizan temperaturas muy elevadas que sólo pueden generarse de forma fiable y a escala a partir de CF. Los productos acabados se transportan desde las fábricas hasta los lugares de instalación en camiones alimentados con gasóleo y, en el caso de las turbinas eólicas a escala industrial, las instalaciones nucleares y las presas hidroeléctricas, se montan *in situ* con grandes máquinas alimentadas con petróleo. Al final de su vida útil, se desmontan, a menudo con CF, y se transportan a vertederos o instalaciones de reciclaje en grandes camiones alimentados con petróleo. No hay ninguna posibilidad de que todos estos procesos que requieren combustibles fósiles puedan ser sustituidos por electricidad renovable en un futuro previsible, y mucho menos en un calendario coherente con el Acuerdo de París.

### **3.1.11. Ganancias de rendimiento en la extracción de energía**

La Ley de Moore, que establece que el número de transistores de un chip microprocesador se duplicará cada dos años aproximadamente, ha impulsado la revolución de la Tecnología de la Información durante 60 años. Esto explica el aumento exponencial de mil millones de veces en la eficiencia de los microchips para almacenar y procesar información.

La Ley de Moore se utiliza a veces para asegurar a la sociedad que puede haber aumentos exponenciales equivalentes en la producción futura de energía renovable [32]. Lamentablemente, la analogía no se sostiene: la ley de Moore es irrelevante para la física de los sistemas energéticos. Los motores de combustión están sujetos al Límite de Eficiencia de Carnot, las células solares al Límite de Shockley-Queisser y los aerogeneradores al Límite de Betz. Según el Límite de Shockley-Queisser, una célula fotovoltaica convencional de una sola unión apenas puede convertir en electricidad un máximo del 33% de la energía solar que incide sobre ella (las células solares de varias capas podrían teóricamente duplicar esta eficiencia, pero pueden ser órdenes de magnitud más caras; son útiles en la exploración espacial, pero no son prácticas para aplicaciones terrestres a gran escala) [87,88]. Los sistemas fotovoltaicos comerciales más modernos alcanzan un poco más del 26% de eficiencia de conversión, cerca de su límite de eficiencia teórica. El límite de Betz establece que la eficiencia máxima teórica de una turbina eólica es de poco más del 59%, lo que significa que las palas pueden convertir como máximo esta cantidad de energía cinética del viento en electricidad [89,90]. En la actualidad, las turbinas superan el 45% de eficiencia, lo que hace difícil alcanzar beneficios adicionales.

Los optimistas de ojillos brillantes que sostienen que la cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra supera con creces el consumo de energía mundial confunden el flujo total de energía con la posibilidad de cosecharla en la práctica y, por lo tanto, suelen ignorar las leyes limitantes de la Física.

### **3.1.12. La cuestión de los combustibles líquidos**

Los combustibles líquidos representan actualmente el 81% del consumo mundial de energía no eléctrica. Es muy poco probable que los sustitutos sintéticos de los combustibles líquidos puedan producirse de forma sostenible más allá de pequeñas cantidades para aplicaciones nicho. Esto resulta sumamente problemático, puesto que la civilización urbana moderna depende del transporte por carretera para los suministros esenciales. Como ya se ha dicho, los coches que funcionan con baterías y, en particular, los camiones, tienen serias limitaciones y plantean muchas cuestiones sobre el uso de recursos y la fabricación. También debemos preguntarnos cómo se mantendrán y construirán en el futuro las carreteras y autopistas de asfalto, fabricadas con productos derivados del petróleo y colocadas con maquinaria pesada. Al igual que el brillante sueño verde del transporte electrificado, los sustitutos sintéticos de los combustibles fósiles líquidos plantean innumerables problemas.

### **3.1.13. Biocombustibles frente a la producción de alimentos**

La población actual —y las proyecciones de crecimiento de la población— sólo puede ser alimentada mediante el uso de una serie de subsidios alimentados por combustibles

fósiles. Los plaguicidas, herbicidas y fungicidas sintéticos a base de CF, por no hablar de la maquinaria pesada alimentada por petróleo, responsables de la Revolución Verde, han permitido una producción agrícola mucho mayor por unidad de superficie —con un gran coste ecológico— de lo que era posible anteriormente. El sistema actual de distribución de alimentos depende también de sistemas de transporte y refrigeración alimentados por combustibles líquidos. Está claro que la eliminación de los combustibles fósiles del sistema agrícola reduciría considerablemente la producción. Incluso si se promulgara pronto una política mundial de un solo hijo, seguiríamos teniendo entre 8.000 y 3.500 millones de bocas que alimentar a finales de siglo [91]. Incluso en un escenario tan optimista, prácticamente cada centímetro cuadrado de tierra cultivable tendría que dedicarse a la producción de alimentos. Esto prohibiría éticamente la producción a gran escala de combustibles como el bioetanol y el biodiésel. (Es escandaloso que el 40% de la cosecha de maíz de Estados Unidos se dedique a la producción de etanol, fuertemente subvencionada y emisora de carbono, sin prácticamente ninguna ganancia energética neta a lo largo de la historia de su producción [92,93]). El retraso en la promulgación de políticas de reducción de la natalidad, o la absoluta incapacidad para hacerlo, sobre todo en los países con una alta tasa de fertilidad, hace temer un escenario aún más grave.

### **3.1.14. La quimera de otros combustibles sintéticos**

Las algas no son una solución para nuestras necesidades de combustible líquido [29]. Se consume más energía para cultivar las algas que la que generan de forma útil. A pesar de los 60 años de investigación, todavía hay que superar importantes dificultades técnicas. Una invasión de protozoos en un estanque de cultivo puede comerse todas las algas en un plazo de 12 a 18 horas. El Consejo Nacional de Investigación llegó a la conclusión de que aumentar la producción de biocombustible de algas para sustituir incluso el 5% del combustible para el transporte en Estados Unidos supondría una demanda insostenible de energía, agua y nutrientes. El Departamento de Energía de Estados Unidos concluyó que "los sistemas para la producción a gran escala de biocombustibles a partir de algas deben desarrollarse a escalas que son varios órdenes de magnitud mayores que todas las instalaciones de cultivo de algas actuales a nivel mundial combinadas".

El hidrógeno sintético tampoco es una opción. Como ya se ha dicho, el hidrógeno es también un sumidero neto de energía aparte de ser extremadamente difícil de transportar y almacenar.

### **3.1.15. Electrificación del transporte**

La electrificación del sistema ferroviario de mercancías parece improbable [29]<sup>12</sup>. La actual flota estadounidense de 25.000 locomotoras, en su mayoría diésel-eléctricas, consumiría tanta electricidad de la red como 55 millones de coches eléctricos. La electrificación de las

12 Obviamente aquí se están refiriendo los autores a la red ferroviaria estadounidense. En otros países, como España, ya está electrificada en una importante proporción. La media en la UE es actualmente de algo más del 50% de las líneas electrificadas. Suiza está a la cabeza con el 100% de electrificación.

principales rutas (casi 260.000 de los 322.000 km de vías) requeriría el equivalente de la energía generada por 240 centrales eléctricas (teniendo en cuenta, además, que la carga ferroviaria es una de las más difíciles de afrontar para una compañía eléctrica). También se necesitaría una red nacional, que aún no existe, o al menos una red muy ampliada<sup>13</sup>.

Un sistema ferroviario de pasajeros totalmente eléctrico es igualmente improbable. Al igual que en el caso del transporte de mercancías, requeriría una red ampliada. Los trenes de pasajeros son muy ineficientes debido a las constantes paradas y aceleraciones [94] y son extremadamente costosos. El proyecto de tren de alta velocidad de California, que conectará todo el Estado, se estimó inicialmente en 33.000 millones de dólares, pero en 2019 el precio se había disparado hasta los 79.000 millones. Los costes anuales de explotación y mantenimiento se calculan actualmente en 228 millones de dólares [95].

Con la aceleración del cambio climático, la posible escasez de alimentos, la ausencia de alternativas viables a los combustibles fósiles y el momento en que "los camiones dejen de funcionar" no muy lejano [29], las perspectivas de nuestra civilización globalizada, urbanizada, basada en el transporte y en el *just-in-time*,<sup>14</sup> son nefastas [96].

## 4. Resumen. Y lo único que podría salvar a la civilización de la más completa ruina<sup>15</sup>

Hemos expuesto debilidades fatales en esa vía principal a la que aspira la sociedad para combatir el cambio climático. El espejismo del GND pinta una imagen de "energía limpia asequible" que ignora innumerables costes que no pueden ser asumidos en ninguna medida razonable. Sugiere soluciones para el gran problema climático-energético que son imposibles de realizar con las tecnologías actuales y, desde luego, no en el plazo especificado por el IPCC y el Acuerdo de París.

El GND no sólo es falla en el aspecto técnico, sino también al no ubicar la alteración del clima en el contexto más amplio del sobrepasamiento ecológico. El cambio climático antropogénico no es más que un síntoma del sobrepasamiento y no puede tratarse de forma aislada con respecto a la enfermedad principal. El GND ofrece poco más que una versión ecológica del *statu quo* basado en el crecimiento insostenible. Incluso si fuera factible, su puesta en práctica sólo agravaría la disfunción ecológica humana.

13 En los EE. UU. existen varias redes eléctricas interconectadas. Algunas son propias de un Estado, como la tejana, mientras que otras agrupan a varios Estados.

14 Sistema productivo propio del *toyotismo* basado en minimizar el almacenamiento y realizar sólo los pedidos a proveedores de los elementos imprescindibles para lo que se tenga que producir a corto plazo.

15 Nuevamente aquí usan los autores la expresión *salvage civilization*. Vid. nota al comienzo.

Entonces, ¿qué podría rescatar<sup>16</sup> realmente a un mundo dependiente de los combustibles fósiles y que está en sobrepasamiento? La respuesta es asombrosamente sencilla y a la vez desgraciadamente complicada: el mundo debe abandonar el imperativo del crecimiento material del capitalismo neoliberal y afrontar que la vida material *después* de los combustibles fósiles se parecerá mucho a la vida *antes* de los combustibles fósiles. Dicho de otro modo, debemos actuar según el imperativo ecológico para alcanzar una vida digna para todos en un único planeta<sup>17</sup>. Esto implica moverse en tres amplios frentes.

## 4.1. Realismo energético

En primer lugar, debemos renunciar a nuestra fe en la alta tecnología moderna y, en su lugar, centrar nuestra atención en la comprensión de cómo será un panorama energético genuinamente renovable. Como se ha señalado, las llamadas *tecnologías de energías renovables* que se proponen como soluciones no son ni renovables ni posibles de construir e implementar en ausencia de CF. No son neutras en carbono y simplemente aumentarán la dependencia humana de los recursos no renovables y causarán un daño social y medioambiental inaceptable.

Las fuentes de energía verdaderamente renovables se basarán en gran medida en la biomasa (especialmente la madera), el simple aprovechamiento mecánico de viento y agua, la energía solar pasiva y la fuerza animal y humana. Esto significa que la sociedad tendrá que innovar y adaptar su camino a través de grandes reducciones en el suministro de energía. La ventaja es que las nuevas variantes de las viejas tecnologías de extracción serán más sofisticadas desde el punto de vista ecológico que las llamadas *energías renovables* actuales, se ajustarán mejor a las necesidades esenciales y se construirán siendo conscientes del imperativo de la conservación. Sobre este último punto, es importante destacar que aproximadamente el 62% del flujo de energía que circula por la economía moderna se desperdicia por ineficiencia [97], e incluso más por usos triviales o al menos no esenciales (pensemos en los sopladores de hojas y los vehículos todoterreno de recreo). A nivel mundial, el consumo de energía per cápita se ha multiplicado por nueve desde 1850, aunque el bienestar percibido no lo ha hecho en igual medida. En conjunto, estos hechos demuestran que hay mucho margen para reducir el uso de la energía de forma indolora.

Una reducción de la energía significa que habrá un resurgimiento de la demanda de músculo humano y de animales de tiro. Los habitantes de las sociedades ricas en combustibles fósiles tienden a olvidar que esa energía industrial hace ahora el trabajo que antes hacían las personas y los animales. ¿Cuántos estadounidenses son conscientes de que tienen cientos de "esclavos energéticos", per cápita, continuamente trabajando para

16 Hemos optado en esta frase por traducir *salvage* haciendo referencia a la acción de rescate de una civilización naufragada.

17 De nuevo el concepto de *one-Earth living*.

proporcionarles bienes y servicios que han llegado a dar por sentados? Según Hagens y White [98], si ignoramos la electricidad nuclear e hidroeléctrica, "el 99,5% del 'trabajo' en las economías humanas lo realizan el petróleo, el carbón y el gas natural" (para un resumen del concepto de *esclavo energético* y varias definiciones, véase [99]). Una vez más, es importante destacar el lado positivo que acompaña a este cambio. Más trabajo humano significará más vidas físicamente activas en contacto más estrecho con los demás y con la Naturaleza, lo que puede restaurar nuestro destrozado sentido del bienestar y la conexión con la tierra. Del mismo modo, la disminución de la atención prestada al progreso material permitirá que el énfasis se desplace hacia el progreso de la mente y del espíritu, fronteras en gran medida inexploradas en la actualidad pero con un potencial ilimitado.

Por lo que respecta a los animales de tiro, el número de caballos y mulas de trabajo en Estados Unidos alcanzó un máximo de 26 millones en torno a 1915 —cuando la población humana en el país era de unos 100 millones—, para ser sustituido gradualmente por equipos agrícolas e industriales impulsados por combustibles fósiles [100]. Si Estados Unidos vuelve a depender de la mano de obra animal, es posible que el país vuelva a necesitar esta cantidad de animales de tiro en caso de que la población se reduzca también a 100 millones. Si la población humana se mantiene en torno a los 333 millones de habitantes de 2021, la población de caballos y mulas necesaria podría llegar a los 87 millones y requerir unos 70 millones de hectáreas de tierra para la producción de pastos y forraje (nótese que de los cinco a 10 millones de caballos que hay actualmente en Estados Unidos, sólo un 15% son animales de trabajo en granjas o ranchos [100]).

## 4.2. Reducción de la población

El segundo frente de una estrategia de vida en una sola Tierra es un estándar mundial de fecundidad de un solo hijo o hija. Esto es necesario para reducir la población mundial a los mil millones de personas, aproximadamente, que pueden prosperar de forma sostenible con un confort material razonable dentro de las limitaciones de un futuro sin energía fósil y de una Tierra ya muy dañada [101,102]. Incluso un paso tan aparentemente audaz como éste puede ser insuficiente para evitar el sufrimiento generalizado, ya que una política de este tipo aplicada en una o dos décadas nos dejaría todavía con unos tres mil millones de almas para finales de siglo [91]. Si no se aplica una estrategia de reducción de la población planificada y relativamente indolora, se garantizará un choque demográfico traumático impuesto por la naturaleza en un mundo devastado por el clima y carente de energía fósil. (Es posible que ya se esté produciendo un colapso de la población humana impuesto por un entorno —aunque no la Naturaleza— comprometido por la acción del ser humano. Estudios controvertidos han documentado pruebas de la caída del recuento de esperma —de más del 50%— y otros síntomas de la feminización de los hombres, especialmente en los países occidentales, causados por productos químicos industriales que imitan a las hormonas femeninas; véase, por ejemplo, [103]).

Debe ponerse en perspectiva la preocupación por la restricción de la libertad de procreación, por el racismo y por la coacción física que dominan gran parte del discurso actual sobre la reducción de la población. La población es una cuestión ecológica que, si no se controla, puede tener consecuencias catastróficas. La curva de crecimiento de la población humana en los últimos 200 años se asemeja a la fase de auge, o "plaga", del tipo de brote de población que se produce en las especies no humanas en condiciones ecológicas inusualmente favorables (en nuestro caso, la abundancia de recursos que ofrece la energía barata y abundante). Los brotes de plaga terminan invariablemente en colapso bajo la presión del estrés social o cuando se agotan los recursos cruciales [104].

Las culturas anteriores han reconocido este hecho, junto con la necesidad de regular la población, durante miles de años [105,106]. Un equilibrio sensato entre la libertad y el bienestar de los individuos y de la sociedad implica saber cuándo hay que moverse ágilmente entre estos polos al cambiar las circunstancias. Tal vez no haya grito que pueda movilizar más hacia la restricción de ciertas libertades individuales que la amenaza inminente de un colapso socio-ecológico mundial.

Aunque no parece que haya que señalarlo, una política universal de un solo hijo aplicada a escala mundial no es discriminatoria. Es más, está totalmente justificada cuando la motivación es la restauración de la integridad ecológica para el bienestar de las generaciones presentes y futuras, tanto humanas como no humanas. Afortunadamente, existe una completa caja de herramientas socialmente justas y humanas para lograr la necesaria reducción de la población [107,108]. El hecho de que históricamente se hayan utilizado algunas prácticas inhumanas en determinadas circunstancias no es razón para ignorar la gravedad del sobrepasamiento contemporáneo y los amplios mecanismos disponibles para la planificación demográfica sostenible. En lo que respecta a los aspectos medioambientales y sociales del exceso de población, ninguna otra acción individual se aproxima si quiera a las consecuencias negativas de tener un hijo [109].

Debemos tener en cuenta que la población humana compatible con la capacidad de carga es una variable gestionable cuya magnitud dependerá, en parte, del nivel de vida material preferido por la sociedad. Este es un planeta finito con una capacidad productiva limitada. Una tasa constante y sostenible de producción de energía y materiales podrá mantener obviamente a menos personas con un nivel medio de vida alto que con un nivel de vida más bajo.

No podemos insistir lo suficiente en que un régimen energético no fósil simplemente no puede soportar ni de lejos la actual población humana de casi ocho mil millones; esto requiere urgentemente reducir el número de personas lo más rápidamente posible para evitar niveles sin precedentes de malestar social y sufrimiento humano en las próximas décadas. (Esto contradice la preocupación generalizada de que el descenso de la tasa de

fertilidad en muchos países —sobre todo de renta alta— es motivo de alarma; véase, por ejemplo, [110]).

### 4.3. Contracción y transformación radical de la sociedad

El tercer gran frente de una estrategia de sostenibilidad de una única Tierra para todos es un plan totalmente transformador para remodelar los fundamentos sociales y económicos de la sociedad y, al mismo tiempo, gestionar una contracción sistemática de las actividades humanas (esto último para ser coherente con las estimaciones de la Global Footprint Network de que la humanidad está en un 75% de sobrepasamiento). Esto es necesario, en parte, por la necesidad de eliminar gradualmente la energía fósil dentro de un plazo y un presupuesto de carbono establecidos. (La situación es cada vez más urgente; Spratt *et al.* [111] sostienen que apenas existe un presupuesto para mantenerse incluso dentro de los +2 °C<sup>18</sup>). Cualquiera que sea el presupuesto de combustibles fósiles identificado, debe ser racionado y asignado a: (1) los usos esenciales, como la agricultura y el transporte esencial a granel; y (2) el desmantelamiento de las infraestructuras peligrosas basadas en los combustibles fósiles y su sustitución por infraestructuras y cadenas de suministro basadas en las renovables.

Otros elementos de dicho plan serían: (3) una reestructuración económica y política conforme a las nuevas realidades energéticas y materiales (por ejemplo el final de la deuda con intereses y puede que incluso una transformación hacia intereses negativos; un enfoque renovado en la construcción de la comunidad y de la autosuficiencia regional; la relocalización de la producción esencial y otras actividades económicas; el énfasis en la resiliencia económica por encima de la mera eficiencia; y un cambio en el control sobre el uso de la tierra y los recursos para ponerla en manos de organismos locales de autogobierno); (4) reciclaje profesional hacia nuevas formas de trabajo y empleo; (5) planificación social para garantizar una asignación y distribución justa de los recursos de la sociedad, ya que es intrínsecamente injusto que algunos individuos se apropien de mucho más de lo que les corresponde de la limitada generosidad de la Tierra; (6) migraciones planificadas y reasentamiento de las poblaciones actualmente residentes en densos centros urbanos insostenibles y en las costas vulnerables; y (7) restauración de los ecosistemas a gran escala. La restauración serviría para múltiples propósitos, no sólo para crear empleo con un sentido, sino también para recuperar la integridad de los ecosistemas en beneficio de los seres humanos y no humanos por igual, capturar el carbono, aumentar la resiliencia socio-ecológica y aumentar el *stock* de biomasa disponible para el consumo humano de energía. En muchos aspectos, este esfuerzo se asemejará a la Gran Transformación de Polanyi [112] (que hablaba sobre el dominio emergente de la economía de mercado neoliberal) pero en sentido inverso, todo ello dentro de un marco de necesidad ecológica.

18 En el contexto de la lucha contra el cambio climático, se habla de *presupuesto de carbono* como aquella cantidad que aún nos podríamos permitir emitir antes de sobrepasar cierto umbral de seguridad.

Las acciones para embarcarse rápida, juiciosa y sistemáticamente en la transformación serán de una escala y de un nivel de esfuerzo mucho mayores que la movilización de la Segunda Guerra Mundial y requerirán niveles de cooperación mundial sin precedentes. En nuestra opinión, deben cumplirse dos condiciones principales y simultáneas para que esta empresa tenga alguna posibilidad de éxito. En primer lugar, debemos contar con políticos que se preocupen por la gente y por el planeta (es decir, que no estén en deuda con intereses corporativos, monetarios o de otro tipo) y que estén dispuestos a luchar ferozmente por la estabilidad ecológica y la justicia social. Esto pasa primeramente por quiénes son los que elegimos (los políticos no aparecen mágicamente en los cargos, nosotros los ponemos ahí), haciéndoles rendir cuentas implacablemente y luchando por eliminar el dinero de la política. En segundo lugar, la historia demuestra que las élites gobernantes y adineradas no renuncian a su poder por voluntad propia; hay que forzar su mano. Prácticamente no se ha conseguido ningún beneficio importante simplemente *pidiendo* a los que están en el poder que hagan lo correcto. Hay que ejercer una presión implacable para que las personas y/o los sistemas en cuestión no tengan más remedio que capitular ante demandas concretas y bien pensadas. Debemos volver a los revolucionarios del pasado que, a un gran coste, nos proporcionaron el mundo mejor en el que vivimos ahora a través de la acción directa e inteligente y la asunción de riesgos.

Para adoptar una metáfora bíblica, puede ser más fácil que un camello pase por el ojo de una aguja que la humanidad cambie su paradigma predominante y se embarque en un descenso planificado y voluntario desde un estado de sobrepasamiento hasta una relación armónica y homeostática con la ecosfera, en sólo una o dos décadas. Pero, por otra parte, la historia demuestra que prácticamente todos los logros importantes han surgido de la búsqueda tenaz de lo aparentemente imposible. Contemplar la alternativa es impensable.

**Contribuciones de los autores:** Redacción-borrador original, M.K.S.; redacción-contenido adicional, W.E.R.; revisión y edición-M.K.S., W.E.R. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito. **Financiación:** Esta investigación no recibió financiación externa. **Declaración de la Junta de Revisión Institucional:** No aplicable. **Declaración de consentimiento informado:** No aplicable. **Conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

# Referencias

1. Jacobson, M.Z.; Delucchi, M.A.; Cameron, M.A.; Mathiesen, B.V. Matching Demand with Supply at Low Cost in 139 Countries among 20 World Regions with 100% Intermittent Wind, Water, and Sunlight (WWS) for All Purposes. *Renew. Energy* **2018**, *123*, 236-248.
2. Williams, J.H.; Jones, R.A.; Haley, B.; Kwok, G.; Hargreaves, J.; Farbes, J.; Torn, M.S. Carbon-Neutral Pathways for the United States. *AGU Adv.* **2021**.
3. Larson, E.; Greig, C.; Jenkins, J.; Mayfield, E.; Pascale, A.; Zhang, C.; Drossman, J.; Williams, R.; Pacala, S.; Socolow, R.; *et al.* *Net-Zero America: Potential Pathways, Infrastructure, and Impacts, Interim Report*; Princeton University: Princeton, NJ, USA, 2020.
4. Bogdanov, D.; Ram, M.; Aghahosseini, A.; Gulagi, A.; Oyewo, A.S.; Child, M.; Caldera, U.; Sadovskaia, K.; Farfan, J.; De Souza Noel Simas Barbosa, L.; *et al.* Low-Cost Renewable Electricity as the Key Driver of the Global Energy Transition towards Sustainability. *Energy* **2021**, *227*, 120467.
5. Carlock, G.; Mangan, E. *A Green New Deal: A Progressive Vision for Environmental Sustainability and Economic Stability*. Disponible en línea: <https://www.dataforprogress.org/green-new-deal-report> (consultado en 21 de mayo de 2021).
6. Comité Selecto de la Cámara de Representantes sobre la Crisis Climática. Disponible en línea: <https://climatecrisis.house.gov> (consultado el 21 de mayo de 2021).
7. *Recognizing the Duty of the Federal Government to Create a Green New Deal*, H.R. 109, 116º Congreso. 2019. Disponible en línea: <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/house-resolution/109/text> (consultado el 30 de mayo de 2021).
8. Roser, M.; Ritchie, H.; Ortiz-Ospina, E. *World Population Growth. Our World in Data*. 2013. Disponible en línea: <https://ourworldindata.org/world-population-growth#how-has-world-population-growth-changed-over-time> (consultado el 30 de mayo de 2021).
9. Smil, V. Harvesting the Biosphere: The Human Impact. *Popul. Dev. Rev.* **2011**, *37*, 613-636.
10. Smil, V. *Harvesting the Biosphere: What We Have Taken from Nature*; MIT Press: Cambridge, MA, USA, 2012.
11. Bar-On, Y.M.; Phillips, R.; Milo, R. The Biomass Distribution on Earth. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2018**, *115*, 6506-6511.
12. McRae, L.; Deinet, S.; Freeman, R. The Diversity-Weighted Living Planet Index: Controlling for Taxonomic Bias in a Global Biodiversity Indicator. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0169156. [CrossRef]
13. Hughes, D. (Global Sustainability Research, Calgary, AB, Canadá). Comunicación personal, 2019.
14. BP. *BP Statistical Review of World Energy*, 67ª edición; BP: Londres, Reino Unido, 2018.
15. Dukes, J.S. Burning Buried Sunshine: Human Consumption of Ancient Solar Energy. *Clim. Chang.* **2003**, *61*, 31-44.

16. Global Footprint Network. Disponible en línea: [https://data.footprintnetwork.org/?\\_ga=2.9934709.1352344526.1610740013-650899000.1610740013#/compareCountries?type=earth&cn=5001&yr=2017](https://data.footprintnetwork.org/?_ga=2.9934709.1352344526.1610740013-650899000.1610740013#/compareCountries?type=earth&cn=5001&yr=2017) (consultado el 21 de mayo de 2021).
17. Vidal, O.; Goffé, B.; Arndt, N. Metals for a Low-Carbon Society. *Nat. Geosci.* **2013**, *6*, 894–896.
18. Hund, K.; LaPorta, D.; Fabregas, T.; Laing, T.; Drexhage, J. *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*; The World Bank Group, Climate-Smart Mining Initiative: Washington, DC, Estados Unidos, 2020.
19. Michaux, S.P. *The Mining of Minerals and the Limits to Growth*; Geological Survey of Finland: Espoo, Finlandia, 2021.
20. Sovacool, B.K.; Hook, A.; Martiskainen, M.; Brock, A.; Turnheim, B. The Decarbonisation Divide: Contextualizing Landscapes of Low-Carbon Exploitation and Toxicity in Africa. *Glob. Environ. Chang.* **2020**, *60*, 102028.
21. Sovacool, B.K. Who Are the Victims of Low-Carbon Transitions? Towards a Political Ecology of Climate Change Mitigation. *Energy Res. Soc. Sci.* **2021**, *73*, 101916.
22. Friedmann, J.; Zhiyuan, F.; Tang, K. *Low-Carbon Heat Solutions for Heavy Industry: Sources, Options, and Costs Today*; Columbia Center on Global Energy Policy: Nueva York, NY, USA, 2019.
23. Lovegrove, K.; Alexander, D.; Bader, R.; Edwards, S.; Lord, M.; Mojiri, A.; Rutovitz, J.; Saddler, H.; Stanley, C.; Urkalan, K.; et al. *Renewable Energy Options for Industrial Process Heat*; ITP Thermal/Australian Renewable Energy Agency (ARENA): Turner, Australia, 2019.
24. McMillan, C.; Boardman, R.; McKellar, M.; Sabharwall, P.; Ruth, M.; Bragg-Sitton, S. *Generation and Use of Thermal Energy in the U.S. Industrial Sector and Opportunities to Reduce its Carbon Emissions*; Joint Institute for Strategic Energy Analysis: Golden, CO, USA, 2016.
25. Sandalow, D.; Friedmann, J.; Aines, R.; McCormick, C.; McCoy, S.; Stolaroff, J. *ICEF Industrial Heat Decarbonization Roadmap*; Innovation for Cool Earth Forum: Tokio, Japón, 2019. Disponible en línea: [https://www.icef-forum.org/pdf/2019/roadmap/ICEF\\_Roadmap\\_201912.pdf](https://www.icef-forum.org/pdf/2019/roadmap/ICEF_Roadmap_201912.pdf) (consultado el 26 de mayo de 2021).
26. Chowdhury, M.S.; Rahman, K.S.; Chowdhury, T.; Nuthammachot, N.; Techato, K.; Akhtaruzzaman, M.; Tiong, S.K.; Sopian, K.; Amin, N. An Overview of Solar Photovoltaic Panels' End-of-Life Material Recycling. *Energy Strategy Rev.* **2020**, *27*, 100431.
27. Xu, Y.; Li, J.; Tan, Q.; Peters, A.L.; Yang, C. Global Status of Recycling Waste Solar Panels: A Review. *Waste Manag.* **2018**, *75*, 450–458.
28. Liu, P.; Barlow, C.Y. Wind Turbine Blade Waste in 2050. *Waste Manag.* **2017**, *62*, 229–240.
29. Friedemann, A.J. *When Trucks Stop Running*; SpringerBriefs in Energy; Springer International Publishing: Cham, Suiza, 2016; ISBN 9783319263731.
30. Moore, J.; Rees, W.E. Getting to One-Planet Living. En *State of the World 2013: Is Sustainability Still Possible?* Island Press/Center for Resource Economics: Washington, DC, USA, 2013; pp. 39-50, ISBN 9781610914581.

31. Agencia Internacional de la Energía. World Total Final Consumption (TFC) by Source. Disponible en línea: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020/final-consumption> (consultado el 26 de mayo de 2021).
32. Mills, M. *The "New Energy Economy": An Exercise in Magical Thinking*; The Manhattan Institute: Nueva York, NY, EE.UU., 2019.
33. Zehner, O. *Green Illusions: The Dirty Secrets of Clean Energy and the Future of Environmentalism*; Our sustainable future; University of Nebraska Press: Lincoln, NE, EE.UU., 2012; ISBN 97803237759.
34. Universidad de California Berkeley, Escuela Goldman de Políticas Públicas. *The 2035 Report: Plumming Solar, Wind, And Battery Costs Can Accelerate Our Clean Electricity Future*. 2020. Disponible en línea: <https://www.pv-magazine.com/2020/03/18/the-us-added-13-3-gw-of-solar-in-2019-beating-wind-and-gas-in-new-capacity/> (consultado el 26 de mayo de 2021).
35. Wesoff, E. The US Added 13.3 GW of Solar in 2019, Beating New Wind and Gas Capacity. *PV Magazine*, 18 de marzo de 2020. Disponible en línea: <https://www.pv-magazine.com/2020/03/18/the-us-added-13-3-gw-of-solar-in-2019-beating-wind-and-gas-in-new-capacity/> (consultado el 26 de mayo de 2021).
36. Clack, C.T.M.; Qvist, S.A.; Apt, J.; Bazilian, M.; Brandt, A.R.; Caldeira, K.; Davis, S.J.; Diakov, V.; Handschy, M.A.; Hines, P.D.H.; *et al.* Evaluation of a Proposal for Reliable Low-Cost Grid Power with 100% Wind, Water, and Solar. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2017**, *114*, 6722-6727.
37. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. *Renewable Industrial Process Heat*. Disponible en línea: <https://www.epa.gov/rhc/renewable-industrial-process-heat> (consultado el 21 de mayo de 2021).
38. Administración de Información Energética de los Estados Unidos. *Use of Energy Explained: Energy Use in Industry*. Disponible en línea: <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/industry.php> (consultado el 21 de mayo de 2021).
39. Agencia Internacional de la Energía. *Report Extract: An Introduction to Biogas and Biomethane*. Disponible en línea: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane> (consultado el 26 de mayo de 2021).
40. Adnan, A.I.; Ong, M.Y.; Nomanbhay, S.; Chew, K.W.; Show, P.L. Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review. *Bioengineering* **2019**, *6*, 92.
41. Lozanovski, A.; Lindner, J.P.; Bos, U. Environmental Evaluation and Comparison of Selected Industrial Scale Biomethane Production Facilities across Europe. *Int. J. Life Cycle Assess* **2014**, *19*, 1823-1832.
42. Angelidaki, I.; Treu, L.; Tsapekos, P.; Luo, G.; Campanaro, S.; Wenzel, H.; Kougias, P.G. Biogas Upgrading and Utilization: Current Status and Perspectives. *Biotechnol. Adv.* **2018**, *36*, 452-466.
43. Koonaphapdeelert, S.; Aggarangsi, P.; Moran, J. *Biomethane: Production and Applications*; Green Energy and Technology; Springer: Singapur, 2020; ISBN 9789811383069.
44. Ahlström, J.M.; Zetterholm, J.; Pettersson, K.; Harvey, S.; Wetterlund, E. Economic Potential for Substitution of Fossil Fuels with Liquefied Biomethane in Swedish Iron and Steel Industry-Synergy and

Competition with Other Sectors. *Energy Convers. Manag.* **2020**, *209*, 112641.

45. Turiel, A. Fiebre del hidrógeno 2.0 (I). El choque del petróleo, 17 de noviembre de 2020. Disponible en línea: <https://crashoil.blogspot.com/2020/11/la-fiebre-del-hidrogeno-20-i.html> (consultado el 31 de junio de 2021).
46. Nature Needs Half. Disponible en línea: <https://natureneedshalf.org> (consultado el 16 de junio de 2021).
47. Mulvaney, D. Solar Energy Isn't Always as Green As You Think. *IEEE Spectrum*, 13 de noviembre de 2014. Disponible en línea: <https://spectrum.ieee.org/green-tech/solar/solar-energy-isnt-always-as-green-as-you-think> (consultado el 26 de mayo de 2021).
48. De Wild-Scholten, M.J.; Alsema, E.A. Environmental life cycle inventory of crystalline silicon photovoltaic module production. En *Proceedings of the Materials Research Society Fall 2005 Meeting*, Boston, MA, USA, 28 de noviembre-2 de diciembre de 2005.
49. Sisodia, A.K.; Mathur, R.K. Impact of Bird Dropping Deposition on Solar Photovoltaic Module Performance: A Systematic Study in Western Rajasthan. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2019**, *26*, 31119-31132.
50. Adinoyi, M.J.; Said, S.A.M. Effect of Dust Accumulation on the Power Outputs of Solar Photovoltaic Modules. *Renew. Energy* **2013**, *60*, 633-636.
51. Agencia Internacional de Energías Renovables, Photovoltaic Power Systems Programme. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. 2016. Disponible en línea: <https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels> (consultado el 26 de mayo de 2021).
52. De Castro, C.; Capellán-Pérez, I. Standard, Point of Use, and Extended Energy Return on Energy Invested (EROI) from Comprehensive Material Requirements of Present Global Wind, Solar, and Hydro Power Technologies. *Energías* **2020**, *13*, 3036.
53. Capellán-Pérez, I.; de Castro, C.; Miguel González, L.J. Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and Material Requirements in Scenarios of Global Transition to Renewable Energies. *Energy Strategy Rev.* **2019**, *26*, 100399.
54. Ferroni, F.; Guekos, A.; Hopkirk, R.J. Further Considerations to: Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for Photovoltaic Solar Systems in Regions of Moderate Insolation. *Energy Policy* **2017**, *107*, 498-505.
55. Prieto, P.A.; Hall, C.A.S. *Spain's Photovoltaic Revolution: The Energy Return on Investment*; SpringerBriefs in Energy; Energy Analysis; Springer: New York, NY, USA, 2013; ISBN 9781441994363.
56. Universidad de Michigan, Centro de Sistemas Sostenibles. U.S. Energy Storage Factsheet. Pub. No. CSS15-17. Universidad de Michigan, 2020. Disponible en línea: <http://css.umich.edu/factsheets/us-grid-energy-storage-factsheet> (consultado el 26 de mayo de 2021).
57. Elmegaard, B.; Brix, W. Efficiency of Compressed Air Energy Storage. En *Proceedings of the 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Novi Sad, Serbia, 4-7 de julio de 2011.
58. Administración de Información Energética de Estados Unidos. Most Utility-Scale Batteries in the United States Are Made of Lithium-Ion. 2019. Disponible en línea:

<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41813> (consultado el 21 de mayo de 2021).

59. Anuario Estadístico Mundial de la Energía 2020. Electricity Domestic Consumption. Disponible en línea: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html> (consultado el 21 de mayo de 2021).

60. Smil, V. Electric Container Ships Are Stuck on the Horizon: Batteries still can't Scale Up to Power the World's Biggest Vessels. *IEEE Spectrum*, 27 de febrero de 2019. Disponible en línea: <https://spectrum.ieee.org/transportation/marine/electric-container-ships-are-stuck-on-the-horizon> (consultado el 26 de mayo de 2021).

61. Deng, J.; Bae, C.; Denlinger, A.; Miller, T. Electric Vehicles Batteries: Requirements and Challenges. *Joule* **2020**, *4*, 511-515. [CrossRef]

62. Battery University. Batteries against Fossil Fuel. Disponible en línea: [https://batteryuniversity.com/learn/archive/batteries\\_against\\_fossil\\_fuel](https://batteryuniversity.com/learn/archive/batteries_against_fossil_fuel) (consultado el 21 de mayo de 2021).

63. Qiao, Q.; Zhao, F.; Liu, Z.; Jiang, S.; Hao, H. Cradle-to-Gate Greenhouse Gas Emissions of Battery Electric and Internal Combustion Engine Vehicles in China. *Appl. Energy* **2017**, *204*, 1399-1411. [CrossRef]

64. Liebherr. LR 1200.1 Unplugged. Disponible en línea: <https://www.liebherr.com/en/usa/products/mobile-and-crawler-cranes/crawler-cranes/lr-crawler-cranes/details/lr1200unplugged.html> (consultado el 21 de mayo de 2021).

65. Sripad, S.; Viswanathan, V. Performance Metrics Required of Next-Generation Batteries to Make a Practical Electric Semi Truck. *ACS Energy Lett.* **2017**, *2*, 1669-1673. [CrossRef]

66. Etherington, D. Elon Musk Says Tesla Semi Is Ready for Production, but Limited by Battery Cell Output. *TechCrunch*, 27 de enero de 2021. Disponible en línea: <https://techcrunch.com/2021/01/27/elon-musk-says-tesla-semi-is-ready-for-production-but-limited-by-battery-cell-output/> (consultado el 26 de mayo de 2021).

67. Pavel, C.C.; Lacal-Aránzategui, R.; Marmier, A.; Schüller, D.; Tzimas, E.; Buchert, M.; Jenseit, W.; Blagoeva, D. Substitution Strategies for Reducing the Use of Rare Earths in Wind Turbines. *Resour. Policy* **2017**, *52*, 349-357.

68. Law, Y. Radioactive Waste Standoff Could Slash High Tech's Supply of Rare Earth Elements. *Science*, 1 de abril de 2019. Disponible en línea: <https://www.sciencemag.org/news/2019/04/radioactive-waste-standoff-could-slash-high-tech-s-supply-rare-earth-elements> (consultado el 26 de mayo de 2021).

69. Fisher, T.; Fitzsimmons, A. Big Wind's Dirty Little Secret: Toxic Lakes and Radioactive Waste. Instituto de Investigación Energética, 23 de octubre de 2013. Disponible en línea: <https://www.instituteforenergyresearch.org/renewable/wind/big-winds-dirty-little-secret-rare-earth-minerals/> (consultado el 26 de mayo de 2021).

70. Wind-Turbine-Models.com. Turbines. Disponible en línea: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines> (consultado el 21 de mayo de 2021).

71. Hanle, L.J.; Jayaraman, K.R.; Smith, J.S. CO2 Emissions Profile of the U.S. Cement Industry. Disponible en línea: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei13/ghg/hanle.pdf> (consultado el 26 de mayo de 2021).

72. Schmutz, S.; Moog, O. Dams: Ecological Impacts and Management. En *Riverine Ecosystem*

*Management: Science for Governing Towards a Sustainable Future*; Schmutz, S., Sendzimir, J., Eds.; Aquatic Ecology Series; Springer International Publishing: Cham, Suiza, 2018; pp. 111-127, ISBN 9783319732503.

73. Moriarty, P.; Honnery, D. Can Renewable Energy Power the Future? *Energy Policy* **2016**, *93*, 3-7.
74. Warner, K.; Pejchar, L. A River Might Run Through It Again: Criteria for Consideration of Dam Removal and Interim Lessons from California. *Environ. Manag.* **2001**, *28*, 561–575.
75. Zamarrón-Mieza, I.; Yepes, V.; Moreno-Jiménez, J.M. A Systematic Review of Application of Multi-Criteria Decision Analysis for Aging-Dam Management. *J. Clean. Prod.* **2017**, *147*, 217-230.
76. Alexander, S.; Floyd, J. *Carbon Civilisation and the Energy Descent Future: Life Beyond this Brief Anomaly*; The Simplicity Institute/The Rescope Project: Melbourne, Australia, 2018; ISBN 9780994282804.
77. Foro Internacional GenIV. When Will GenIV Reactors Be Built? Disponible en línea: [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_41890/faq-2](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_41890/faq-2) (consultado el 21 de mayo de 2021).
78. Krall, L.; Macfarlane, A. Burning Waste or Playing with Fire? Waste Management Considerations for Non-Traditional Reactors. *Bull. At. Sci.* **2018**, *74*, 326-334. [CrossRef]
79. Cho, A. Smaller, Safer, Cheaper: One Company Aims to Reinvent the Nuclear Reactor and Save a Warming Planet. *Science*, 21 de febrero de 2019. Disponible en línea: <https://www.sciencemag.org/news/2019/02/smaller-safer-cheaper-one-company-aims-reinvent-nuclear-reactor-and-save-warming-planet> (consultado el 26 de mayo de 2021).
80. Chatzis, I. Small Modular Reactors: A Challenge for Spent Fuel Management? Organismo Internacional de Energía Atómica, 8 de agosto de 2019. Disponible en línea: <https://www.iaea.org/newscenter/news/small-modular-reactors-a-challenge-for-spent-fuel-management> (consultado el 26 de mayo de 2021).
81. Jassby, D. Fusion Reactors: Not What They're Crack Up to Be. Boletín de los Científicos Atómicos, 19 de abril de 2017. Disponible en línea: <https://thebulletin.org/2017/04/fusion-reactors-not-what-theyre-cracked-up-to-be/> (consultado el 26 de mayo de 2021).
82. Agencia Internacional de la Energía. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. 2021. Disponible en línea: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (consultado el 26 de mayo de 2021).
83. Sekera, J.; Lichtenberger, A. Assessing Carbon Capture: Public Policy, Science, and Societal Need. *Biophys. Econ. Sust.* **2020**, *5*, 14.
84. Service, F. Cost Plunges for Capturing Carbon Dioxide from the Air. *Science*, 7 de junio de 2018. <https://www.sciencemag.org/news/2018/06/cost-plunges-capturing-carbon-dioxide-air> (consultado el 26 de mayo de 2021).
85. Carbon Engineering. Disponible en línea: <https://carbonengineering.com/> (consultado el 7 de mayo de 2021).
86. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. *Emissions Gap Report 2020*. 2020. <https://www.resilience.org/stories/2017-11-30/gdp-jobs-and-fossil-largesse/> (consultado el 15 de junio de 2021).

87. Vossier, A.; Gualdi, F.; Dollet, A.; Ares, R.; Aimez, V. Approaching the Shockley-Queisser Limit: General Assessment of the Main Limiting Mechanisms in Photovoltaic Cells. *J. Appl. Phys.* **2015**, *117*, 015102.
88. Ehrler, B.; Alarcón-Lladó, E.; Tabernig, S.W.; Veeken, T.; Garnett, E.C.; Polman, A. Photovoltaics Reaching for the Shockley-Queisser Limit. *ACS Energy Lett.* **2020**, *5*, 3029-3033.
89. Jiang, H.; Li, Y.; Cheng, Z. Performances of Ideal Wind Turbine. *Renew. Energy* **2015**, *83*, 658-662.
90. De Lellis, M.; Reginatto, R.; Saraiva, R.; Trofino, A. The Betz Limit Applied to Airborne Wind Energy. *Renew. Energy* **2018**, *127*, 32-40.
91. Bradshaw, C.J.A.; Brook, B.W. Human Population Reduction Is Not a Quick Fix for Environmental Problems. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2014**, *111*, 16610-16615.
92. Patzek, T.W. Thermodynamics of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle. *Crit. Rev. Plant Sci.* **2004**, *23*, 519-567.
93. Gallagher, P.; Yee, W.; Baumes, H. *2015 Energy Balance for the Corn-Ethanol Industry*; Economics Technical Reports and White Papers; Iowa State University: Ames, IA, USA, 2016.
94. Friedemann, A. Why Is Passenger Rail So Damned Inefficient? *Energy Skeptic*. 10 de octubre de 2016. Disponible en línea: <http://energyskeptic.com/2016/why-is-passenger-rail-so-damned-inefficient/> (consultado el 27 de mayo de 2021).
95. Friedemann, A. Will California's High-Speed Rail Go Off the Tracks? *Energy Skeptic*. 9 de mayo de 2019. Disponible en línea: <http://energyskeptic.com/2019/challenges-facing-californias-high-speed-rail-hearing-2014/> (consultado el 27 de mayo de 2021).
96. Rees, W.E. Megacities at risk: The climate–energy conundrum. In *Handbook of Megacities and Megacity-Regions*; Labbé, D., Sorenson, A., Eds.; Edward Elgar Publishing: Cheltenham, UK, 2020; pp. 292–308, ISBN 9781788972703.
97. Laboratorio Nacional Lawrence Livermore. Estimated U.S. Energy Consumption in 2020: 92.9 Quads. Disponible en línea: [https://flowcharts.llnl.gov/content/assets/images/energy/us/Energy\\_US\\_2020.png](https://flowcharts.llnl.gov/content/assets/images/energy/us/Energy_US_2020.png) (consultado el 27 de mayo de 2021).
98. Hagens, N.; White, D.J. GDP, Jobs, and Fossil Largesse. *Resilience*, 30 de noviembre de 2017. <https://www.resilience.org/stories/2017-11-30/gdp-jobs-and-fossil-largesse/> (consultado el 27 de mayo de 2021).
99. Friedemann, A. Energy Slaves: Every American Has Somewhere between 200 and 8000 Energy Slaves. *Energy Skeptic*, 5 de abril de 2020. Disponible en línea: <https://energyskeptic.com/2020/energy-slaves> (accessed on 27 May 2021).
100. Kilby, E.R. The Demographics of the U.S. Equine Population. En *The State of the Animals*; Salem, D.J., Rowan, A.N., Eds.; Humane Society Press: Washington, DC, USA, 2007; pp. 175-205, ISBN 9780974840093.
101. Daily, G.C.; Ehrlich, A.H.; Ehrlich, P.R. Optimum Human Population Size. *Popul. Environ.* **1994**, *15*, 469–475.
102. Pimentel, D.; Harman, R.; Pacenza, M.; Pecarsky, J.; Pimentel, M. Natural Resources and an

Optimum Human Population. *Popul. Environ.* **1994**, *15*, 347–369.

103. Swan, S.H.; Colino, S. *Count Down: How Our Modern World Is Threatening Sperm Counts, Altering Male and Female Reproductive Development, and Imperiling the Future of the Human Race*; Scribner: New York, NY, USA, 2020; ISBN 9781982113667.

104. Rees, W.E. The fractal biology of plague and the future of civilization. *J. Popul. Sustain.* **2020**, *5*, 15–30.

105. Parsons, J. Population Control and Politics. *Popul. Environ.* **1991**, *12*, 355–377.

106. Diamond, J.M. *Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*; Penguin Books: New York, NY, USA, 2011; ISBN 9780143117001.

107. Hickey, C.; Rieder, T.N.; Earl, J. Population Engineering and the Fight against Climate Change. *Soc. Theory Pract.* **2016**, *42*, 845–870.

108. Robinson, W.C.; Ross, J.A. *The Global Family Planning Revolution: Three Decades of Population Policies and Programs*; The World Bank: Washington, DC, EE.UU., 2007; ISBN 9780821369517.

109. Wynes, S.; Nicholas, K.A. The Climate Mitigation Gap: Education and Government Recommendations Miss the Most Effective Individual Actions. *Environ. Res. Lett.* **2017**, *12*, 74024.

110. Cave, D.; Bubola, E.; Sang-Hun, C. Long Slide Looms for World Population, with Sweeping Ramifications. *New York Times*, 22 de mayo de 2021. Disponible en línea: <https://www.nytimes.com/2021/05/22/world/global-population-shrinking.html> (consultado el 27 de mayo de 2021).

111. Spratt, D.; Dunlop, I.; Taylor, L. *Climate Reality Check 2020*; Breakthrough National Center for Climate Restoration: Melbourne, Australia, 2020.

112. Polanyi, K. *The Great Transformation: The Political and Economic Origins of Our Time*, 2ª ed.; Beacon Press: Boston, MA, USA, 2001; ISBN 97807056431.