

**Futuros tecnocientíficos:
nuevos desafíos en torno a la geoingeniería solar ***

**Futuros da tecnociência:
novos desafios na geoengenharia solar**

***Technoscientific Futures:
New Challenges in Solar Geoengineering***

José Luis Granados Mateo **

Desde mediados del siglo XX, la emergencia y la propagación de las tecnociencias ha acelerado vertiginosamente la transformación de las esferas naturales, habiéndose superpuesto a ellas un nuevo sistema interconectado: la tecnosfera, formada por múltiples objetos artificiales y sus diversas interrelaciones, las cuales suponen buena parte de los riesgos medioambientales de nuestro tiempo. Este artículo explora su expansión durante la Gran Aceleración socioeconómica del siglo XX a partir de dos rasgos característicos de la actividad tecnocientífica: el uso de simulaciones y la intervención meteorológica. Ambas prácticas confluyen actualmente en las propuestas de gestión de la radiación solar (GRS), cuyas pretensiones son la modificación y la regulación de las condiciones atmosféricas en aras de reducir el calentamiento global. Dada la actual crisis climática y los avances en esta geoingeniería, afirmamos que hay factores que suscitan la posible aparición de unas futuras tecnociencias del clima, en base a iniciativas privadas y plataformas de investigación como *Future Earth*. La previsión y prevaloración de los riesgos subyacentes son cuestiones a las que conviene anticiparse desde los estudios CTS y que, junto con otros desafíos, componen una agenda de problemas en torno al Tecnoceno: la época del impacto global de las tecnociencias en el Sistema Tierra.

||

Palabras clave: tecnociencia; Antropoceno; geoingeniería; cambio climático; Gran Aceleración

* Recepción del artículo: 23/01/2020. Entrega de la evaluación final: 19/06/2020.

** Profesor e investigador del Centro de Ética Aplicada de la Universidad de Deusto, España. Correo electrónico: jlgranados@deusto.es.

A emergência e propagação das tecnociências desde meados do século XX acelerou a transformação das esferas naturais, com um novo sistema interligado sobreposto a elas: a tecnosfera, formada por múltiplos objetos artificiais e suas diversas inter-relações, que representam uma grande parte dos riscos ambientais do nosso tempo. Este artigo explora sua expansão durante a Grande Aceleração socioeconômica do século XX a partir de dois aspectos da atividade tecnocientífica: o uso de simulações e a intervenção meteorológica. Ambas as práticas estão atualmente convergindo nas propostas de gestão da radiação solar (SRM), cujas pretensões são a modificação e regulação das condições atmosféricas a fim de reduzir o aquecimento global. Dada a atual crise climática e os avanços desta geoengenharia, afirmamos que existem fatores que dão origem ao possível aparecimento de futuras tecnociências climáticas, baseadas em iniciativas privadas e plataformas de pesquisa como a *Future Earth*. A previsão e a pré-avaliação dos riscos subjacentes são questões que devem ser antecipadas a partir dos estudos CTS e que, juntamente com outros desafios, compõem uma agenda de problemas em torno do Tecnoceno: a era do impacto global das tecnociências sobre o Sistema Terra.

Palavras-chave: tecnociência; Antropoceno; geoengenharia; mudanças climáticas; Grande Aceleração

The emergence and proliferation of techno-sciences since the mid-20th century has rapidly accelerated the transformation of natural spheres. The technosphere is a new interconnected system that has superimposed itself upon the biosphere. It consists of multiple artificial objects and their various interrelationships, accounting for a considerable amount of the environmental risks of our time. This article explores its expansion during the Great Acceleration of the 20th century from two practices within techno-scientific activity: the use of computer simulations and meteorological intervention. Both of them currently converge in the recent proposals for solar radiation management (SRM), which aims to transform and regulate atmospheric conditions in order to reduce global warming. The current climate crisis and the advancements in geoengineering suggest that there are certain elements that may give rise to the appearance of future climate techno-sciences, based on private initiatives and research platforms such as Future Earth. The prediction and prevalence of underlying risks are matters to be anticipated by STS studies. Together, they form an agenda of issues centered on the Technocene: the era of techno-sciences as the main altering force of the Earth System.

Keywords: techno-science; Anthropocene; geoengineering; climate change; Great Acceleration

Introducción

En la segunda mitad del siglo XX, ciencia y tecnología convergieron en una simbiosis que en muchos casos devino inseparable: la tecnociencia (Echeverría, 2003). Las ciencias modernas habían pretendido ante todo conocer cómo es el mundo: describirlo, interpretarlo, comprenderlo, explicarlo y, algunas veces, predecirlo. Sin embargo, tras la Segunda Guerra Mundial buena parte de la actividad científica experimentó una mutación estructural que afectó no solo a los modos en los que se producen nuevos conocimientos, sino también en los que se distribuyen, transmiten, difunden, almacenan y enseñan a través de una inédita imbricación con nuevas tecnologías. Esas revoluciones tecnocientíficas se producen a través de convergencias disciplinarias provocando la proliferación de numerosas tecnociencias que desde mediados del siglo XX orientan su práctica a innovar y transformar el mundo, no solo a conocerlo. Ello no obsta para que la práctica científica, por un lado, y la práctica tecnológica, por el otro, también hayan seguido desarrollando paralelamente su actividad. Por nuestra parte, partimos de la hipótesis de que muchas ciencias transmutaron y que hoy existen ciencias y tecnologías, pero también tecnociencias. Y conviene distinguirlos.¹

Por otra parte, desde principios del siglo XXI ha emergido con fuerza una pluralidad de agendas de investigación en torno al Antropoceno: término de la posible época geológica en la que actualmente nos encontramos (Crutzen y Stoermer, 2000). El cambio climático sería solo un síntoma más de esta nueva etapa, a la que habría que añadir, además, la pérdida sistémica de biodiversidad, la modificación genética de organismos, la acidificación de océanos o la creciente hibridación entre mundos sociales y naturales (Arias Maldonado, 2018). Todas estas manifestaciones reunirían sus causas en el *Homo sapiens sapiens*, que pasaría a convertirse en la fuerza principal de transformación del Sistema Tierra. Aunque su aprobación por parte de la International Commission on Stratigraphy (ICS) y la International Union of Geological Sciences (IUGS) está pendiente de ser oficial, la propuesta como unidad geológica ha cobrado un notable y creciente interés dentro del ámbito académico. No solo entre comunidades de ciencias naturales: también se ha propagado en las agendas de las ciencias sociales y humanidades, las cuales estudian y analizan el Antropoceno como concepto cultural (Trischler, 2017). Sea o no aceptado finalmente por la comunidad geológica, no cabe duda de que el Antropoceno ha estimulado una pluralidad de narrativas y visiones que plantean desafíos filosóficos de gran envergadura.² Retomaremos algunos de ellos en el último apartado. Aquí optaremos por utilizar un término alternativo: el Tecnoceno, puesto que la “época del ser humano” presenta problemas filosóficos indeseables.³

13

1. Para la distinción entre ciencias, tecnologías y tecnociencias, véase Echeverría (2003, cap. I).

2. Consúltense: Trischler, 2017; Arias Maldonado, 2018; Cózar Escalante, 2019b.

3. Esta enmienda terminológica ya ha sido puesta de manifiesto por autores como Hornborg (2015), Sloterdijk (2016), Cera (2017) y Arias Maldonado (2018). Alejándonos de planteamientos esencialistas, nosotros lo utilizaremos para destacar las tecnociencias como uno de los principales sistemas de acciones inductores del cambio cualitativo en el Sistema Tierra. El impacto de las tecnociencias lleva implícita la acción de los seres humanos, ciertamente, pero tampoco es la única ni es independiente de otros factores (Haff, 2013).

En primer lugar, el nuevo tiempo geológico no empezaría con la aparición de los seres humanos, sino con los avances tecnocientíficos del siglo XX que por primera vez aportan una señal sincrónica y global en el registro estratigráfico (Cearreta, 2015). En segundo lugar, la referencia al conjunto de la humanidad oculta qué grupos o qué personas son los verdaderos responsables de los impactos en el Sistema Tierra. Humanidades hay muchas, no una sola. No todas han supuesto fuerzas de transformación geológica, o al menos no en la misma proporción. Por ello preferimos utilizar el término “Tecnoceno” en lugar de “Antropoceno”, adoptando una perspectiva pluralista, axiológica y sistémica centrada en la actividad desarrollada por las diversas tecnociencias, que a nuestro modo de ver son las principales disruptoras del cambio ambiental durante la denominada “Gran Aceleración del siglo XX” (Steffen *et al.*, 2015; McNeill y Engelke, 2016). Dicho período comienza en la década de 1950 y se caracteriza por un crecimiento exponencial de las sociedades en varias dimensiones: población, consumo energético, movilidad o producción industrial, por citar solo algunos ejemplos. Un vertiginoso aceleramiento que está íntimamente ligado con la expansión de múltiples tecnociencias que han ido alterando los mundos sociales, artificiales y por supuesto también los naturales.⁴ Aquí nos centraremos en las transformaciones de esferas naturales a escala mesocósmica, como la biosfera y la geosfera, a las que ahora se superpone un nuevo sistema artificial: la tecnosfera, constituida por una red de interacciones entre humanos y una creciente cantidad de artefactos técnicos, tecnológicos y tecnocientíficos que han ido depositándose sobre la superficie terrestre a lo largo de la historia de las civilizaciones (Haff, 2014; Zalasiewicz *et al.*, 2017).⁵

14

No hay duda de que las tecnociencias aportan grandes ventajas acelerando la producción agrícola e industrial, la circulación global de bienes, personas y biomasa, a la vez que ayudan a planificar la economía y la toma de decisiones políticas. Sin embargo, la dinámica de las tecnociencias cataliza una tecnosfera que también implica situaciones de riesgo a prever y prevalorar. Esta será la propuesta de nuestro trabajo, aunque para ello nos tengamos que limitar a un solo caso. En concreto analizaremos una posible práctica tecnocientífica de actual y previsible interés en un futuro próximo: la geoingeniería, ingeniería climática o tecnociencias del clima, como también podríamos denominar. Estas aún no se han desplegado y su constitución como tecnociencias propiamente dichas está aún por acontecer, en caso de que lleguen a hacerlo. Nuestra tarea aquí es dilucidar sus antecedentes y situación actual, especialmente en los proyectos de gestión de radiación solar (GRS), que pretenden enfriar el planeta a través del control de la cantidad de radiación solar entrante.

Para ello esta contribución parte de una perspectiva axiológica, pluralista y sistémica enmarcada en la filosofía de las tecnociencias (Echeverría, 2015), que a su vez se sitúa dentro de los estudios de ciencia, tecnología y sociedad (CTS).⁶ En el primer

4. Un ejemplo es la transformación de la nanonaturaleza, cuestión tratada por Echeverría (2009a).

5. El origen del término “tecnosfera” proviene de autores como del científico ruso Vladimir Vernadsky, quien teorizó sobre las cinco esferas superpuestas que integran la Tierra: la litosfera (manto terrestre rígido de la superficie del planeta); la biosfera (conjunto de todos los seres vivos); la atmósfera (envoltura gaseosa constitutiva del aire); la tecnosfera (parte de la naturaleza afectada por la actividad humana); y la noosfera (conjunto de los seres vivos dotados de inteligencia). Véase Rispoli y Grinevald (2018).

6. Véase Echeverría (2003, cap. V).

apartado argumentaremos la correlación entre la aparición de las tecnociencias y el comienzo de la Gran Aceleración del siglo XX, momento de inicio del Tecnoceno. Asimismo, desarrollaremos nuestra caracterización de la tecnosfera en varias de sus dimensiones, las cuales están estrechamente vinculadas con la nueva época geológica. En el segundo apartado pasaremos a explorar el rol de las tecnologías digitales en la transformación de la meteorología y las ciencias del clima, así como algunos antecedentes en intervención meteorológica desarrollados durante la Big Science que, después de la crisis medioambiental de finales del siglo XX, vuelven a aparecer en escena reconvertidos en proyectos de geoingeniería. Este último será el tema del tercer apartado, en el que mostraremos cómo se ha ido destapando el tabú de la ingeniería climática hasta establecerse como una posible vía de actuación en el programa *Future Earth*, fomentando determinados tecnopoderes, así como desigualdades e injusticias globales ocultas (Stephens y Surprise, 2020). La anticipación y prevaloración de los riesgos que ello conlleva es un desafío dentro de los muchos que suscita la relación tecnociencia-naturaleza, ya sea considerándola desde una perspectiva temporal, con el Tecnoceno, o desde una perspectiva material, con la tecnosfera. Ambos conceptos no solo ponen de relieve el alto impacto de las tecnociencias en el medioambiente, y viceversa, sino también su previsible importancia a la hora de afrontar los riesgos globales del siglo XXI.

1. Tecnoceno, tecnosferas y la Gran Aceleración del siglo XX

Los defensores de establecer una nueva época geológica están de acuerdo en adjudicar su causa a la actividad de los seres humanos (Arias Maldonado, 2018; Cózar Escalante, 2019b). Lo que se está tratando de dilucidar actualmente es el límite temporal inicial más adecuado, habiéndose propuesto nueve posibilidades (Trischler, 2017). Tres de estas propuestas han sido prominentes en el debate que, bajo nuestro punto de vista, se correlacionan con la respectiva aparición histórica de las técnicas, las tecnologías y las tecnociencias:

15

i) *La revolución técnica*: la transición de la sociedad de cazadores-recolectores a la sociedad sedentaria comenzó con el Neolítico hace aproximadamente 11.700 años, suponiendo un primer período de impacto ecológico significativo. Durante miles de años los seres humanos alteraron grandes porciones del paisaje e intervinieron en el acervo genético natural mediante el cultivo de plantas, la deforestación y la domesticación de animales. La cerámica horneada, la invención del arado, la mejora de las herramientas de piedra y las innovaciones en los métodos de construcción proporcionaron una base para los asentamientos permanentes y el aumento de productividad y población humana. La irrupción de técnicas artesanales posibilitó dichos avances, factores determinantes para algunos autores a la hora de dar comienzo a la nueva época terrestre (Cearreta, 2015).

ii) *La revolución tecnológica*: la industrialización de hace aproximadamente 200 años fue en gran parte impulsada por las nuevas tecnologías basadas en conocimiento científico, las cuales son diferenciables de las antiguas técnicas precientíficas (Quintanilla, 2017). Las tecnologías industriales provocaron una transformación

radical de las sociedades humanas y el medioambiente, apareciendo máquinas que sustituyeron buena parte de las antiguas técnicas de producción de bienes materiales. La mecanización de la mano de obra, la producción a gran escala, la conversión de energía posibilitada por la máquina de vapor y la explotación masiva de carbón y hierro fueron algunas de las claves que hicieron incrementar significativamente los niveles de CO₂ en la atmósfera, lo que podría ser un hecho decisivo para instaurar el comienzo de la nueva época geológica (Crutzen y Stoermer, 2000).

iii) *La revolución tecnocientífica*: a pesar de su vinculación con el conocimiento científico, las tecnologías no se imbricaron sistemáticamente con la ciencia hasta entrados en el siglo XX, momento de aparición de la tecnociencia (Echeverría, 2003). En esta época muchos científicos, ingenieros, técnicos, políticos, industriales y militares empezaron a colaborar conjuntamente a través de una misma estrategia de I+D orientada al crecimiento económico y militar de los países más desarrollados. La imbricación entre ciencia y tecnología pasó a ser indispensable para el desarrollo socioeconómico de los países, el cual se aceleró provocando un cambio cualitativo en la dinámica del Sistema Tierra (McNeill y Engelke, 2016).

Las tres opciones han suscitado discusiones importantes dentro del Anthropocene Working Group (AWG), equipo formado en 2009 por mandato de la International Commission on Stratigraphy (ICS) para dilucidar si el Tecnoceno puede considerarse un nuevo tiempo geológico. Once años después, el AWG ya ha optado por una de ellas.

16

Con las primeras técnicas, el ser humano comenzó a tener una influencia significativa en el medioambiente, pero acotada en algunas regiones y de forma diacrónica. Además, las señales estratigráficas son difíciles de seguir y correlacionar, por lo que la opción i) ligada a la revolución neolítica ha quedado descartada (Cearreta, 2015). La humanidad pasó a convertirse en un factor geológico más pronunciado con las tecnologías industriales, aunque nuevamente las señales estratigráficas están afectadas por discontinuidades a pequeña escala y, por otra parte, indicadores globales como el aumento de CO₂ son graduales a lo largo de varias décadas. De modo que la opción ii) relacionada con la revolución industrial también ha sido rechazada (*Ibid.*). Esto ha llevado a que el 21 de mayo de 2019, con un 88% de votos a favor, el AWG concluyera que las señales estratigráficas de mediados del siglo XX son la base adecuada para continuar con el proceso de oficialización por su carácter global y sincrónico en el registro geológico (Subcommission on Quaternary Stratigraphy, 2019).

Algunos autores se refieren a este lapso temporal como la “Gran Aceleración del siglo XX” (McNeill y Engelke, 2016), cuyas repercusiones ya habían sido señaladas anteriormente como la prueba más convincente a la hora establecer la nueva época geológica (Steffen *et al.*, 2015). Comenzada en la década de 1950, la Gran Aceleración se caracteriza por un crecimiento exponencial de las sociedades en múltiples dimensiones: población, consumo energético, producción industrial y movilidad, entre otras variables (**Imagen 1**). Estas curvas socioeconómicas se presentan a escala global en fenómenos como el uso de petróleo crudo, agua y fertilizantes artificiales,

así como en la construcción de presas, vehículos, teléfonos, restaurantes de comida rápida, e indicadores económicos como el aumento del turismo internacional, las inversiones extranjeras y el producto nacional bruto. A nuestro modo de ver, este cambio cualitativo en las sociedades se correlaciona con la emergencia y expansión de las tecnociencias, una de cuyas claves fundacionales fue el informe *Science, The Endless Frontier* que Vannebar Bush presentó al presidente de Estados Unidos en 1945 (Forman y Sánchez-Ron, 1996; Doel, 2003).

En dicho informe, Bush recalcó la necesidad de invertir en investigación básica con el objetivo de mejorar la seguridad, la salud, los puestos de trabajo e incluso el progreso cultural. Algunos empresarios e industriales vieron en esta “frontera sin fin” una oportunidad para hacer crecer sus negocios e incrementar sus ganancias. Muchos de ellos tuvieron éxito, por lo que la investigación también empezó a ser fomentada por dichas empresas, insertando los laboratorios en complejos de producción industrial. Las instituciones militares más importantes tampoco dudaron del potencial de los avances científico-tecnológicos como fuente provechosa de nuevas armas, tanto de ataque como de defensa. Por eso crearon sus propios laboratorios de investigación e impulsaron y desarrollaron diversos macroproyectos de investigación, claves para la estrategia militar del país (Forman y Sánchez-Ron, 1996). Uno de ellos fue el Proyecto Manhattan, que desembocó en las primeras bombas nucleares y cuya primera detonación en 1945 —junto con las casi 600 explosiones ulteriores— provocaron la expansión de isótopos artificiales radioactivos por todo el globo terrestre. De hecho, el plutonio 239 —con una vida media de 100.000 años— hoy supone el indicador estratigráfico más fiable a la hora de fijar el inicio y desarrollo de la nueva época geológica (Cearreta, 2015).

17

A partir de 1945, las tecnociencias han acelerado las economías de consumo, la transición del carbón al petróleo, el nivel socioeconómico, el uso de energía primaria, el producto interior bruto y el crecimiento de la población. Desde entonces se han producido tres cuartos del impacto atmosférico total producido por la emisión de CO₂ y el número de vehículos motorizados ha aumentado de 40 millones a 1300 millones (**Imagen 1**). La población mundial se ha triplicado y el número de habitantes urbanos ha pasado de 700 millones a 3700 millones. En 1950 el mundo produjo alrededor de un millón de toneladas de plástico, pero en 2015 la cifra aumentó a 300 millones de toneladas. Otro tanto ocurre con las cantidades de nitrógeno sintetizado —como resultado de la producción de fertilizantes— que han pasado de ser menos de cuatro millones de toneladas a más de 85 millones (McNeill y Engelke, 2016). Toda esta contaminación no surge con la tecnociencia, puesto que desde la industrialización ya se estaban ocasionando perjuicios severos en el medioambiente. Pero la influencia de las nuevas capacidades de la tecnociencia y el impacto directo de algunas de ellas ha sido de tal magnitud que, a nuestro modo de ver, ha afectado por primera vez al planeta de forma global y sincrónica. De ahí que prefiramos optar por denominar a esta época como Tecnoceno, término a nuestro juicio más adecuado (Hornborg, 2015; Sloterdijk, 2016; Cera 2017; Arias Maldonado, 2018).

Desde el punto de vista espacial, por otra parte, la propagación de las tecnociencias en el tiempo del Tecnoceno se correlaciona con el crecimiento expansivo de la

tecnosfera (Haff, 2014), que se superpone al resto de esferas naturales.⁷ Está compuesta por sistemas técnicos, tecnológicos y tecnocientíficos que han ido depositando y cementando en la superficie terrestre diferentes objetos y estructuras que actualmente suponen 30 billones de toneladas de peso (Zalasiewicz *et al.*, 2017). Así como la biosfera coevoluciona con su entorno constantemente, modificándolo y superponiéndose a él, también ha de considerarse la tecnosfera como el sistema con el que los seres humanos extraen minerales, generan energía o fabrican nuevos objetos artificiales gracias a una sofisticada estructura social (Ellis, 2015). Actualmente, la influencia humana sobre el resto de las esferas naturales se extiende a lo largo, ancho y alto del globo, incluyendo zonas subterráneas y el espacio exterior. Por eso conviene incluir a la tecnosfera como un componente más del Sistema Tierra, especialmente si se conjuga adecuadamente con el paradigma del Tecnoceno y el resto de las nociones vinculadas a la filosofía de la tecnociencia (Echeverría, 2015).

La concepción de la tecnosfera que proponemos se inserta dentro de la teoría de sistemas, lo cual conlleva un elenco de consecuencias. Por ejemplo, implica que la tecnosfera no se refiera exclusivamente a artefactos aislados, sino a un sistema global interconectado que interactúa con un medio exterior bajo ciertas condiciones iniciales y de contorno.⁸ De este modo, la tecnosfera no está constituida únicamente por máquinas e infraestructuras, sino ante todo por acciones que llevan a cabo diversos agentes en interrelación con objetos artificiales.⁹ El enfoque pluralista y sistémico permite distinguir dichos agentes, así como considerar las diferentes condiciones iniciales y de contorno que repercuten en el despliegue y funcionamiento de las tecnosferas, puesto que están directamente influidas por tecnociencias determinadas. Además, podemos referirnos a la tecnosfera en plural, dado que el enfoque pluralista permite asimismo la concepción de múltiples tecnosferas, las cuales se ensamblan entre sí de diversas maneras dentro de un mismo sistema global interconectado. Una vía de ilustrar esto último es a través de la hipótesis de los tres entornos (Echeverría, 1999). Veámosla, aunque solo sea sucintamente.

El medioambiente natural concerniría a un primer entorno (E1), que subsume a las esferas naturales, las cuales funcionan mayoritariamente en base a energía solar. La litosfera, la atmósfera o la hidrosfera forman parte de este primer entorno. A él se le superpone el segundo entorno (E2), continente de las urbes y ámbitos sociales, que ya es un espacio de acciones artificial compuesto por diversas tecnosferas físicas. Los componentes de esta modalidad de tecnosfera incluyen entidades materiales como aviones, transistores o estaciones eléctricas, pero también las estructuras sociales que regulan su flujo, como el mercado o un determinado sistema económico (Zalasiewicz *et al.*, 2017). Por eso son sistemas y no solo infraestructuras o artefactos, pues incluyen a agentes en sus procesos, propiedades estructurales, relaciones y ambientes donde se

7. Algunos ejemplos de esferas naturales son la hidrosfera (agua), atmósfera (aire), litosfera (tierra), la biosfera (seres vivos), etc.

8. Para la concepción sistémica análoga de las técnicas y tecnologías, véase Quintanilla (2017). Para el caso de las tecnociencias, véase Echeverría (2003).

9. Pueden ser objetos técnicos (ladrillos, piezas de sílex, martillos), tecnológicos (coches, carreteras, edificios) y tecnocientíficos (teléfonos móviles, nanomateriales, organismos modificados genéticamente).

desarrollan diversos procesos. La tecnosfera marina, por ejemplo, contiene entidades como submarinos, barcos o islas artificiales, pero como sistema posee características distintivas con respecto a las tecnosferas subterráneas, en las que se incluyen las minas o túneles de transporte. Los sistemas de acciones no son homologables, pues se sitúan en diferentes entornos y dependen de condiciones particulares. Otro tanto ocurre con la tecnosfera aérea, a la que aludiremos más adelante. Esta incluye el aire acondicionado del interior de muchos edificios y por supuesto el CO₂, el metano, aerosoles y otros gases de efecto invernadero producidos por las actividades agrícolas e industriales. Todas las tecnosferas físicas de E2 son sistemas que se desenvuelven gracias a la entrada de recursos de E1, mayoritariamente provenientes de la quema de hidrocarburos como el petróleo, gas y carbón.¹⁰ Por tanto, el adecuado acoplamiento de las tecnosferas con las esferas naturales deviene un asunto importante para el buen funcionamiento del Sistema Tierra.

A los dos primeros entornos hay que añadir la superposición del espacio electrónico tercer entorno (E3), donde se desarrolla una tecnosfera digital que posee propiedades estructurales muy diferentes (Echeverría, 1999). El uso de centros de datos, redes de comunicación o de cualquier dispositivo digital conforman este entorno, propiedad emergente del sistema de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y que, en general, proporciona nuevos espacios de acciones posibles. Las actividades que se realizan en E3 afectan profundamente a E1 y E2, por ejemplo, en cuestiones como la toma de decisiones políticas, la automatización y sincronización de la actividad industrial —conocida como Industria 4.0— o la circulación de recursos materiales por el globo terrestre. De hecho, podríamos afirmar que la economía digital acelera la economía fósil, puesto que el incremento de la eficiencia en los procesos conlleva el aumento de bienes y servicios. No obstante, se ha de considerar que la tecnosfera digital demanda una elevada y creciente tasa de energía de las esferas a las que se superpone. Históricamente, han sido los dispositivos electrónicos los elementos principales de consumo energético, pero a medida que los aparatos son cada vez más compactos y eficientes, la mayor parte del consumo se ha ido trasladando a las grandes plataformas basadas en la nube que reemplazan e incrementan las capacidades de almacenamiento y computación de los dispositivos individuales. De hecho, las instalaciones de alojamiento web y de *cloud hosting* más grandes requieren una cantidad de energía para refrigerarse equivalente a la que puede consumir una ciudad media de E2 (Greenpeace, 2017). De modo que también hay que tener muy en cuenta la actividad en E3 a la hora de evaluar el impacto global de las tecnosferas en el Sistema Tierra, puesto que el espacio digital se abastece de ellas y por ende también lo hace con las esferas naturales a las que estas se superponen.

Como consecuencia, uno de los mayores problemas de la tecnosfera —a diferencia de la biosfera— es el reciclaje incompleto de desechos.¹¹ Esto hace que una parte

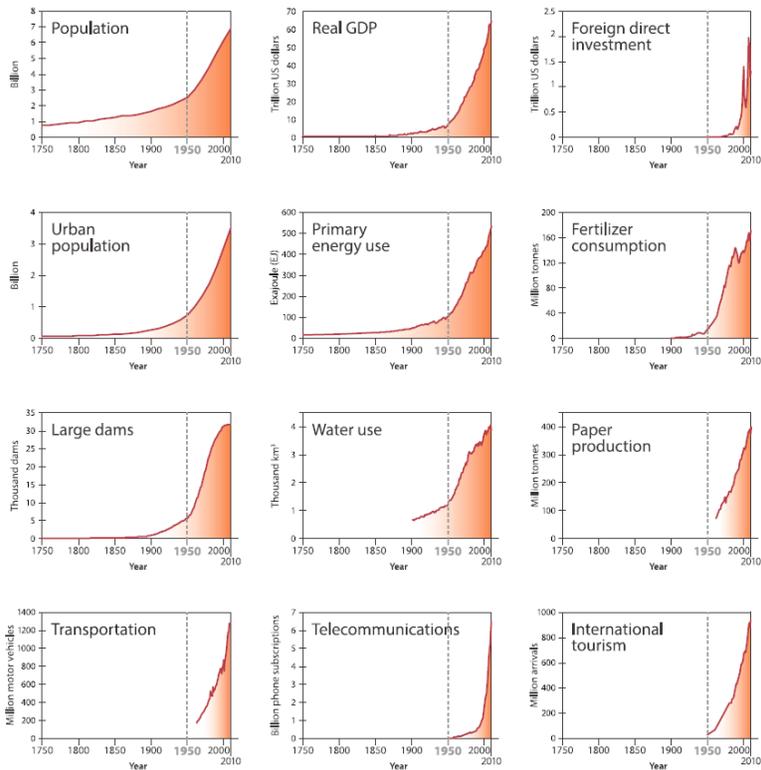
10. De modo similar a la fotosíntesis de la biosfera, cabe señalar que la tecnosfera también obtiene parte de su energía directamente del sol, por ejemplo, a través del uso de placas fotovoltaicas.

11. De forma inversa, las esferas naturales también influyen en las diversas tecnosferas. Piénsese en la degradación que experimenta cualquier sistema tecnológico que se expone prolongadamente al medioambiente natural.

significativa de la tecnosfera no solo se acumule en forma de residuos sólidos en los vertederos, sino también en forma de gases que se vierten a la atmósfera, como el CO₂ y el metano, y otros contaminantes que acaban en la hidrosfera y en sedimentos superficiales de E1 (Zalasiewicz *et al.*, 2014). Por eso la tecnosfera física incluye una gran variedad de tecnofósiles que ya forman parte del registro geológico planetario y que tras la irrupción de las tecnociencias su diversidad sobrepasa en número y variabilidad la diversidad biológica actual (Zalasiewicz *et al.*, 2014). Podríamos decir, en otras palabras, que la tecnodiversidad supera ya la biodiversidad. Se podría realizar, incluso, una taxonomía de los tecnofósiles desarrollados desde mediados del siglo XX, de forma análoga a la clasificación biológica. Muchos de los tecnofósiles electrónicos, por ejemplo, se acumulan en vertederos como el de Agbogbloshie (Ghana), donde objetos compuestos por plomo, cadmio, bromo, dioxinas cloradas y otras cuantas sustancias tóxicas componen un tecnoestrato de miles de hectáreas que suponen, por otra parte, el lugar de trabajo de muchos trabajadores locales. Por tanto, conviene diferenciar las partes activas y pasivas —o residuales— de la tecnosfera. Una cosa son los tecnofósiles electrónicos y otra cosa, por ejemplo, es el desarrollo de dispositivos con obsolescencia programada que en gran parte los generan. Todos ellos pertenecen a la actividad de la tecnosfera, pero las acciones que involucran son distinguibles.

20

Podríamos decir más cosas acerca de las tecnosferas, pero basten estas nociones para introducir mínimamente nuestra conceptualización acerca de esta “sobrenaturaleza”, por decirlo en términos de Ortega y Gasset (1939). Al igual que en el caso de las esferas naturales, existe una pluralidad de tecnosferas, cada una de las cuales no se reduce únicamente a máquinas o artefactos. Es importante señalar que, a nuestro modo de ver, son sistemas de acciones que incluyen agencias determinadas y que en muchos casos corresponden a las distintas tecnociencias que han venido emergiendo desde el inicio del Tecnoceno. En el siguiente apartado pasaremos a introducir dos casos de la macrociencia o *Big Science*, primera fase de la tecnociencia que produjo una enorme aceleración no solo del avance epistémico, sino ante todo de la capacidad de acción a nivel económico, industrial, político, social y militar. Las tecnosferas se expandieron por el globo y la propia macrociencia coevolucionó con la Gran Aceleración socioeconómica del siglo XX. Pero no solo cambiando su tamaño y ritmo de crecimiento, sino algo más profundo: la estructura de la actividad científica.

Imagen 1. Tendencias de 1750 a 2010 del desarrollo socioeconómicoFuente: Steffen *et al.*, 2015

2. Clima y meteorología durante la macrociencia

Durante el período de la *Big Science* se generaron los primeros sistemas de investigación y desarrollo (I+D), apareciendo las primeras políticas nacionales de ciencia y tecnología y la conformación sistemática de equipos de investigación multidisciplinares. Estos eran financiados, gestionados y evaluados por agencias tanto públicas como privadas que constituyeron un nuevo modo industrializado de producción y gestión de conocimiento. Se estableció el denominado “contrato social de la ciencia”, consistente en una asociación estratégica entre científicos, ingenieros, técnicos, empresarios, industriales, políticos y, en muchos casos, también militares. Estos siete diferentes tipos de agentes solían trabajar hasta el momento de forma aislada, o acaso en colaboraciones puntuales o indirectas. Con la emergencia de la macrociencia, sin embargo, componen la agencia plural de la actividad macrocientífica, la cual se fue integrando y consolidando durante el siglo XX en los Estados Unidos, en base a los macroprogramas de investigación de la Segunda Guerra Mundial y a iniciativas semejantes en la ulterior época de la Guerra Fría. Aquí nos centraremos en los proyectos relacionados con la predicción tecnocientífica y

la intervención meteorológica, puesto que ilustran algunos antecedentes de lo que más tarde evolucionó en geoingeniería (Marchetti, 1977) o ingeniería climática (Lamb, 1971). Ambos casos ejemplifican la mutación axiológica que experimentaron tanto en la actividad científica como tecnológica, intersecándose en una estructura de actividad emergente y que, en lo que nos atañe, supuso la expansión de diversas tecnosferas.

2.1. Intervención meteorológica y tecnosfera aérea

La atmósfera contiene recursos como el oxígeno que abastece a grandes zonas de la biosfera y algunas tecnosferas.¹² Se trata de un espacio atravesado continuamente por aeronaves y a menudo cargado de componentes como CO₂, metano y otros gases de efecto invernadero que pueden perdurar varios milenios (Zalasiewicz *et al.*, 2014). Este tipo de elementos componen una tecnosfera aérea residual, a la cual hay que añadir una parte activa constituida por el tráfico aéreo, entre otras actividades humanas. Desde el inicio del Tecnoceno dichas actividades han sido muy numerosas, uno de cuyos ejemplos es la intervención meteorológica (Fleming, 2004, 2010; Bonnheim, 2010).

Los primeros intentos de alterar los patrones meteorológicos comenzaron a finales del siglo XIX, pero no aparecieron en el escenario público hasta la década de 1950 en los EEUU, cuando el estado se interesó en llevarlos a cabo a través de programas vinculados a las tecnociencias atmosféricas de la *Big Science*, llegando a convertirse en una línea central en las agendas de investigación (Harper, 2017). Muchos de los proyectos estuvieron ligados a la producción de lluvia artificial, como el proyecto desarrollado durante la década de los 50 en la empresa estadounidense General Electric Research Laboratory (Fleming, 2007). Un grupo de trabajadores descubrió que la generación de nubes sobre-enfriadas con químicos presentaba una estructura cristalográfica similar al hielo que provoca las precipitaciones, lo que indujo la práctica de la “siembra de nubes”. Al principio, la intención era el aumento —o disminución— de lluvias en zonas secas o con necesidad de riego, así como la anticipación de granizos, fuertes tormentas o cualquier otro evento meteorológico que pudiera afectar negativamente a la agricultura. Sin embargo, pronto el equipo de investigadores pasó a ser asesor del ejército norteamericano en el Proyecto Cirrus, el primer gran estudio de física de nubes y modificación artificial del tiempo atmosférico (Harper, 2017). La Oficina Meteorológica Federal de los Estados Unidos lanzó el Proyecto Cirrus para investigar la génesis y comportamiento de las precipitaciones, pero no estuvo predominado por valores epistémicos: el principal valor consistió en la generación de lluvia artificial en aras a aumentar el beneficio social y militar (Byers, 1974; Harper, 2008).

Por su parte, la idea de controlar la meteorología también cristalizó en la macrociencia soviética (Zikeev y Doumani, 1967; Shaw, 2015). Y no solo en espacios reducidos, sino que exploró la modificación del clima a gran escala. El “Gran Plan para la transformación de la naturaleza” promovido por Stalin en los años 40 pretendía

12. Muchos sistemas biológicos se abastecen de la atmósfera, pero también lo hacen diversas tecnosferas, ya sea como viento para el funcionamiento de turbinas o para la respiración industrial, o como medio de transmisión de ondas de radio (Zalasiewicz *et al.*, 2016).

hacer del clima —algo irracional y caprichoso— un fenómeno “planeado, ordenado y proletario” (Josephson y Zeller, 2003). Los métodos de control meteorológico pasaron a ser un problema importante dentro de la agenda macrocientífica soviética, especialmente en el Instituto de Hidrometeorología de Leningrado (Keith, 2000). Los objetivos de las investigaciones incluían la creación de un enorme mar en Siberia, la descongelación de parte del océano ártico o la reconducción de ríos a las zonas más secas de la Unión Soviética (Josephson, 2011). Por supuesto, estas maniobras estaban encaminadas a aumentar la producción del estado e incrementar su capacidad de acción militar (Zikeev y Doumani, 1967; Shaw, 2015). Una estrategia que impulsaron tanto la Unión Soviética como los Estados Unidos y que desembocó en una “guerra climatológica” por el dominio del planeta (Fleming, 2007).

A finales de la década de los 50, el avance de la Unión Soviética en el despliegue de la tecnosfera física y la consecuente superioridad en varios ámbitos de la macrociencia — como el lanzamiento de la sonda Sputnik en 1957— indujo al gobierno norteamericano a aumentar la inversión en el pronóstico y control del tiempo, ascendiendo a la agenda nacional de política científica. La importancia de la cuestión había aumentado tanto que Henry Houghton, jefe del departamento de meteorología del Massachusetts Institute of Technology (MIT), concluyó que “la investigación básica en meteorología solo puede ser justificada por la importancia económica de mejorar los pronósticos del tiempo, pero la posibilidad de controlarlo es algo obligatorio” (Keith, 2000, p. 252). Ello llevó a impulsar iniciativas como el Proyecto Stormfury, financiado y desarrollado conjuntamente por la Marina y el Departamento de Comercio, y cuyo objetivo fue debilitar ciclones tropicales mediante la siembra de nubes (Uekötter, 2010).

23

Otro tanto sucedió con el Proyecto BATON, apoyado por el Departamento de Defensa y por la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada, o el más conocido Proyecto POPEYE. Llevado a la práctica entre 1967 y 1972, esta iniciativa generó grandes extensiones de nubes artificiales sobre la *Ho Chi Minh Trail* de Vietnam, con la intención de inundar la armada vietnamita del norte (Weart, 2011). Sin embargo, acabó haciéndose público y, aprovechando los conflictos internos de los Estados Unidos, la Unión Soviética llevó a las Naciones Unidas los perjuicios causados por el control de la meteorología. Tras el debate internacional, se convino una prohibición de uso hostil o militar de las Técnicas de Modificación Medioambiental, entre 1976 y 1978. Como consecuencia, la inversión militar en estas técnicas decreció a partir de 1980, pero ello no impidió que otros fines pudieran legitimarlas. De hecho, en la propia Convención de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo se sugiere que la modificación del clima podría contribuir a la preservación y mejora del medioambiente (McNeill y Unger, 2010; Harper, 2008).

Conclusión: la financiación gubernamental, convergencia entre científicos y tecnólogos, la industrialización y militarización de la práctica científico-tecnológica, la relevancia de la política científica y la subordinación de objetivos científicos sobre los militares son algunos rasgos de los programas de intervención meteorológica que permiten caracterizarlos como macrociencia (Echeverría, 2003). Como es habitual en las actuaciones de esta fase tecnocientífica, la mayor parte de las operaciones de intervención meteorológica se guardaron bajo secreto y fueron supervisadas por diversos agentes que velaron por la satisfacción de una pluralidad de valores

superpuestos. Precisamente, esto es algo que muestra cierta continuidad con los proyectos de geingeniería que abordaremos más adelante, aunque la escala a la que pretendan intervenir en la atmósfera sea más amplia y sus fines estén íntimamente vinculados con una situación que repercute a todos los países: el calentamiento global.

2.2. Predicciones en la tecnosfera digital

A partir de 1945 se produjeron importantes avances en Teoría de la Información (Claude Shannon) que junto a la nueva lógica computacional (John von Neumann), la física de semiconductores (William B. Shockley y Walter H. Brattain) y la aparición de la cibernética (Nobert Wiener) permitieron sentar las bases de uno de los motores de la Gran Aceleración del siglo XX: la tecnosfera digital. Gracias a los primeros ordenadores electrónicos se aumentó la capacidad de acción en la gestión de la administración pública, la economía, la explotación de recursos, la industria y, por supuesto, la nueva práctica macrocientífica.

Los sistemas axiológicos de esta fase de la tecnociencia no eran equivalentes a la suma de los científicos y tecnológicos. Incluyeron nuevos valores como la anticipación, que no ha de confundirse con la tradicional predicción científica. Así como esta suele constituir uno de los rasgos más representativos de teorías o modelos científicos, la predicción tecnocientífica se caracteriza por la capacidad de pronosticar fenómenos probabilísticamente en base a modelos y simulaciones computacionales. Dado que muchos macroproyectos respondían a demandas políticas y una de ellas era poder anticiparse al futuro, hubo una expansión de herramientas que comenzaron a predecirlo con fines políticos, facilitando así el tratamiento de sistemas complejos como la economía y el medioambiente (Heymann *et al.*, 2017). Una de las claves fue el trabajo de John von Neumann en los laboratorios de Los Álamos a finales de 1945. De hecho, el primer problema ejecutado en el reciente Computador e Integrador Numérico Electrónico (ENIAC) fue fundamental para el desarrollo de uno de los puntos de partida estratégico del Tecnoceno: la bomba de hidrógeno.

La predicción tecnocientífica comenzó basándose en simulaciones de Monte Carlo, las cuales pasaron a ser herramientas esenciales para instituciones especializadas. Los centros de investigación, *think tanks*, empresas privadas y autoridades gubernamentales formaron parte de un creciente y variado panorama de culturas de predicción¹³ con diversas prácticas materiales y estructuras axiológicas. Estas prácticas no solo se quedaron entre científicos e ingenieros, sino que pasaron a informar y moldear prácticas sociales, como en el caso del histórico informe *Restoring the Quality of Our Environment* del Comité Asesor Científico del presidente Johnson, que advirtió sobre los efectos nocivos de las emisiones generadas por la quema de combustibles fósiles. Algunos sectores industriales también pusieron especial interés en la predicción tecnocientífica, como el American Petroleum Institute, que es la

13. La expresión “cultura de predicción” fue acuñada por el sociólogo Gary Alan Fine para referirse a la cultura de pronosticar el tiempo meteorológico en la oficina de Chicago del Servicio Nacional de Meteorología de EEUU. Recientemente, Matthias Heymann, Gabriele Gramelsberger y Martin Mahony lo han utilizado en plural enfatizando las múltiples culturas de predicción surgidas a lo largo del siglo XX (Heymann *et al.*, 2017).

asociación comercial más grande de los Estados Unidos para la industria del petróleo y el gas natural.¹⁴

Por su parte, la meteorología y las ciencias del clima se vieron asimismo transformadas por la irrupción de la tecnosfera digital y las simulaciones. Gracias a ellas fue posible dar con avances epistémicos significativos, por ejemplo, a la hora de desarrollar versiones más sofisticadas de los cálculos de Arrhenius.¹⁵ Otro tanto sucede con las imágenes que proporcionaban los satélites artificiales situados en la tecnosfera orbital (Gärdebo *et al.*, 2017), los cuales capturaron por primera vez extensiones espaciales considerables que permitieron concebir el aire, la temperatura o los frentes cálidos y fríos como objetos epistémicos visibles. Sin computación, sin satélites artificiales de medición y, en general, sin una simbiosis científico-tecnológica, hubiera sido altamente improbable tener una visión de conjunto que permitiese estudiar el clima como un objeto de escala planetaria (Heymann y Achermann, 2018).

Durante la década de los 70, la concienciación acerca del calentamiento global se hizo presente no solo en las comunidades científicas, sino también en sectores cada vez más amplios de la sociedad (Philander, 2008). El primer gran congreso reconocido acerca del cambio climático fue la Conferencia sobre Desarrollo Humano de la Naciones Unidas, en 1972. Aquí se hizo obvia la capacidad de los ordenadores para presentar resultados a partir de modelos numéricos del clima sobre el siguiente siglo, por lo que las simulaciones empezaron a convertirse en instrumentos útiles para la política global sobre medioambiente (Heymann y Hundebøl, 2017). De hecho, al final de la década de los 80, la Organización Mundial Meteorológica (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) colaboraron en la constitución del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), una institución macrocientífica creada para “proveer a los legisladores de evaluaciones científicas regulares, implicaciones y riesgos potenciales futuros, así como presentar opciones de adaptación y mitigación del cambio climático” (IPCC, 2019). Desde entonces, el IPCC ha producido cinco informes: 1990, 1995, 2001, 2007 y 2014. Todos ellos basados en revisiones realizadas por investigadores seleccionados por sus respectivos gobiernos, quienes participan conjuntamente en la financiación de la institución.

Conclusión: las nuevas políticas medioambientales fueron un síntoma más de la crisis generalizada de la macrociencia, buena parte de la cual se debió a su alto impacto sobre el medioambiente. La energía nuclear, las bombas atómicas, los reactores nucleares, la lluvia ácida, el agujero de la capa de ozono y la basura atmosférica generada por los satélites artificiales obsoletos son algunos ejemplos que estuvieron directamente ligados a la emergencia y desarrollo de la tecnosfera y que ulteriormente motivaron movimientos ecologistas en contra de la actividad

25

14. En 1968, por ejemplo, el Stanford Research Institute realizó un estudio para ellos en el que se alertaba de los cambios en la temperatura que podían esperarse para el año 2000 (Robinson y Robbins, 1968).

15. Aprovechando la capacidad de la computación digital para integrar numéricamente las curvas de absorción, Syukuro Manabe y Richard Wetherald realizaron en 1967 el primer cálculo detallado del efecto invernadero incorporando la convección: el modelo unidimensional radioactivo-conectivo Manabe-Wetherald (Weart, 2011). Con dicho modelo pronosticaron que una duplicación del dióxido de carbono en la atmósfera haría incrementar aproximadamente 2°C en la temperatura global.

macrocientífica. Desde entonces cualquier intención de manipular el clima ha sido descartada, dada la alta incertidumbre de sus consecuencias y los altos riesgos que conlleva. Sin embargo, su interés por parte de científicos, ingenieros, empresarios y políticos ha ido creciendo en las últimas dos décadas. La predicción tecnocientífica a través de modelos y simulaciones computacionales supone, de hecho, la principal metodología de investigación actual.

3. La geoingeniería hoy: ¿Hacia una nueva revolución tecnocientífica?

La *Big Science* sigue existiendo hoy en día, pero a partir de los años 80 emergió la tecnociencia propiamente dicha, promovida principalmente por la iniciativa privada en los Estados Unidos (Echeverría, 2003). Dos de los factores clave que indujeron esta evolución fueron la nueva política fiscal fomentada por el gobierno de Reagan, así como cambios significativos en la ley estadounidense de patentes. Desde el punto de vista axiológico, el paso de la macrociencia a la tecnociencia supuso la total integración de los valores propios del capitalismo en el núcleo de la actividad científico-tecnológica. Su práctica pasó a estar regida bajo el imperativo de innovar, en consonancia con la reaparición de las teorías económicas evolucionistas. La nueva política de I+D pasó a impulsar la iniciativa privada como motor de la investigación y produjo una reestructuración del sistema norteamericano de ciencia y tecnología, al que años más tarde le siguieron los de Europa. Es importante señalar que en ellos emergió un nuevo agente del sistema, la sociedad, y con ella la irrupción de los valores sociales en la actividad científica. Buena parte de ello se debió a las protestas hacia la militarización de la macrociencia y su falta de transparencia, que habían instaurado un clima generalizado de desconfianza entre la población. No en vano fue el momento de surgimiento de los estudios de CTS, y con ellos la evaluación y políticas del riesgo (Lopez Cerezo y Luján, 2000). Otros subsistemas axiológicos aparecieron asimismo en escena, como los valores ecológicos y jurídicos, cuyo peso hasta entonces había sido escaso.

26

En términos generales, las características básicas de las nuevas tecnociencias fueron la financiación privada de la investigación, la convergencia reforzada entre ciencia y tecnología, la aparición de empresas tecnocientíficas, la organización en red de la investigación, la orientación a transformar los diversos mundos (naturales, sociales, artificiales), el marketing de su actividad, el registro y comercialización de patentes y el uso intensivo de las TIC (Echeverría, 2003). El éxito de muchas de estas actividades fue inmediato, especialmente en el sector de las TIC, farmacología, tecnomedicina, tecnociencias de la alimentación o en las nanotecnociencias (Echeverría, 2009a). Sin embargo, no todas las actividades macrocientíficas mutaron en tecnociencias propiamente dichas. La intervención meteorológica y las ciencias del clima, por ejemplo, fueron casos particulares en los que su estructura axiológica estuvo fuertemente predominada por valores ecológicos, jurídicos, políticos y sociales, en detrimento de los valores propios del capitalismo. No evolucionaron en empresas tecnocientíficas como sí ocurrió en otras áreas de la macrociencia. Al menos por el momento.

3.1. Destapando el tabú de la geoingeniería

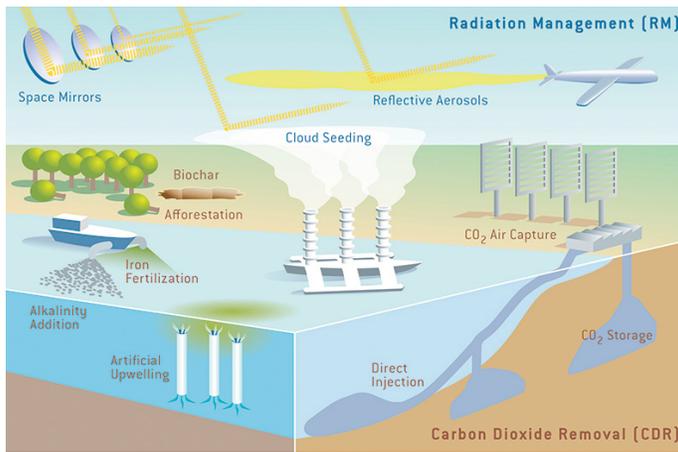
El uso de tecnologías para la modificación del clima había sido un tema tabú de la política medioambiental, puesto que los esfuerzos se han centrado en reducir las emisiones y transitar hacia un modelo de desarrollo más sostenible (Baskin, 2019). Buena parte de la investigación actual en ciencias del cambio climático viene representada por el IPCC, como hemos mencionado anteriormente. Desde su constitución, esta agencia macrocientífica ha liderado la opinión científica sobre el cambio climático, así como el conocimiento acerca de sus impactos y riesgos naturales, políticos y económicos. También suele proveer posibles opciones de mitigación y adaptación al cambio climático, la mayoría de ellas vinculadas a la reducción de emisiones. Sin embargo, el último informe del IPCC (2014) incluyó por primera vez la *geoingeniería*,¹⁶ es decir: la “manipulación intencional a gran escala del clima planetario para contrarrestar el cambio climático antropogénico” (Royal Society, 2009, p. 1).

Un punto de inflexión para la consideración de la geoingeniería fue la publicación de un artículo escrito por Paul Crutzen (2006), el principal proponente del concepto “Antropoceno” y premio Nobel por sus aportes en el estudio del agujero de ozono. La dificultad de alcanzar acuerdos internacionales en la reducción de emisiones y la observación del enfriamiento inducido por la erupción del Pinatubo, hicieron que Crutzen propusiera combatir el calentamiento global inyectando partículas de azufre en la estratosfera. Una técnica de geoingeniería que, junto con otras relacionadas con el aumento de albedo de las nubes o espejos orbitales (**Imagen 2**), se sitúa dentro de los proyectos de gestión de la radiación solar (GRS). Desde entonces se han propuesto diversas opciones, tanto de GRS como de extracción de dióxido de carbono (EDC). Aquí solo nos centraremos en algunas propuestas de GRS, que son las que actualmente tienen mayores cotas de aceptación entre la comunidad científica (Royal Society, 2009).

27

16. Tras el declive de la macrociencia militarizada del siglo XX, la primera manifestación que proponía la geoingeniería solo fue la del informe *Implications of Greenhouse Warming*, publicado en 1992 por la National Academy of Sciences. En este informe se analizaron varias posibles técnicas de geoingeniería, recalando la posibilidad de que un despliegue de estas sería más rentable que las políticas de reducción de emisiones CO₂. Sin embargo, no tuvo éxito en ese momento.

Imagen 2. Esquema de algunas propuestas de gestión de la radiación solar y extracción de dióxido de carbono



Fuente: Kiel Earth Institute

28

El NASA Ames Research Center mostró rápidamente su interés en las técnicas de GRS o geoingeniería solar, y estuvo a favor de empezar a experimentar a escalas regionales (NASA, 2007). Sin embargo, tras un *workshop* organizado en la Universidad de Stanford, los científicos solo definieron cuestiones relacionadas con la incertidumbre de las consecuencias (Feicher y Quante, 2017). Muchos de ellos estaban investigando a través de simulaciones, que hasta el momento ha sido la principal metodología de investigación para la comprensión del sistema climático y la evaluación de sus efectos potenciales. Dentro del marco del IPCC, los modelos han permitido simular un abanico de escenarios futuros posibles, pero a estos escenarios le siguieron esfuerzos por usar los modelos climáticos para explorar vías de optimización del clima, no solo de pronosticarlo. Un ejemplo de ello es el trabajo del *Geoengineering Model Intercomparison Project* (GeoMIP), en el que 12 grupos de modeladores desarrollan simulaciones para evaluar los efectos de la GRS.¹⁷

Por otra parte, los modelos climáticos del IPCC no requieren ser tan sofisticados para la toma de decisiones, pero en cuanto mejoren las prestaciones tecnológicas y las simulaciones puedan dar resultados más fiables, es posible que la geoingeniería pueda disponer de legitimación suficiente para desplegarse. Para que una política pueda aceptar los experimentos se necesita ampliar las dimensiones de los resultados de los modelos. No solo importan los impactos en el clima, sino también

17. Nótese que, así como las primeras simulaciones fueron empleadas de forma heurística, con los últimos desarrollos también han pasado a asumir un rol instructivo, pues en función de los resultados que estas proporcionan, las diferentes propuestas de geoingeniería se diseñan de una manera u otra (Feichter y Quante, 2017).

sus consecuencias en los sistemas humanos, terrestres y marinos. Por eso el desarrollo de nuevos desarrollos técnicos y tecnológicos es la clave para avanzar en la domesticación de la incertidumbre, actividad genuinamente tecnocientífica. Para ello se requiere una interacción simbiótica entre ciencia y tecnología con el objetivo de asegurar que las asunciones realizadas por la investigación científica son acordes con las capacidades y criterios de aplicación de la ingeniería. Por un lado, por ejemplo, es cuestión científica la demostración de que ciertos aerosoles en unas condiciones de contorno determinadas incrementan significativamente el albedo de las nubes. Por otro lado, se necesita investigar desde una perspectiva ingenieril el modo tecnológico de generar ese fenómeno. No son asuntos independientes, sino que uno depende íntimamente del otro. Una convergencia reforzada entre ciencia y tecnología que supone un primer rasgo de una tecnociencia latente.

Hace menos de una década se ha puesto en marcha el Proyecto SPICE (*Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering*, 2013), cuya financiación la obtuvieron científicos británicos con el objetivo de mejorar las estimaciones y reducir la incertidumbre de los efectos de la GRS. La novedad estriba en que en esta ocasión la investigación no solo se ha basado en modelos computacionales, sino que han incluido experimentos para evaluar la confiabilidad de las simulaciones. La falta de regulación del gobierno sobre la geoingeniería y, sobre todo, el surgimiento de conflictos de valores ha hecho que finalmente fueran cancelados (Cressey, 2012). Por el momento, el panorama axiológico tiende a valorar la separación de la investigación de intereses económicos debido a que la geoingeniería no es solo un posible modelo de negocio, sino también un daño potencial incierto en el Sistema Tierra. No obstante, varios autores defienden que es posible que la situación cambie en un futuro (Stavins y Stowe, 2019). Y una de las posibles vías para que ocurra puede darse en el seno de macroprogramas como el *Future Earth*.

29

3.2. *Future Earth*: investigación para la sostenibilidad global

Tras la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible en Río de Janeiro 2012, programas de investigación como el *International Geosphere-Biosphere Programme*, el *International Human Dimensions Programme* o el *World Climate Research Program* pasaron a integrarse, junto con otra veintena de programas internacionales, en la plataforma *Future Earth: Research for Global Sustainability* (2014). El macroprograma supuso una nueva agencia tecnocientífica basada en la alianza entre varios consejos científicos, agencias financieras y organizaciones de las Naciones Unidas que promovieron una convergencia disciplinaria orientada a la solución de problemas medioambientales. Partiendo del reconocimiento de la escala y complejidad del Tecnoceno (Beck, 2019), se hizo necesaria la coalición de dos principales agencias: las ciencias de la tierra y las ciencias de la sostenibilidad, las cuales pasaron a competir y cooperar entre sí en un sistema multiagente.

El nuevo *leitmotiv* de *Future Earth* pone de relieve el codiseño de las agendas de investigación y la coproducción de conocimiento con diversos actores sociales (representantes del gobierno, grupos de la sociedad civil, juristas, sector privado, etc.). Sin embargo, teniendo en cuenta que los diversos agentes parten de sistemas axiológicos diferentes, hay ocasiones en las que se pueden generar conflictos de

valores. Por un lado, las ciencias de la tierra provienen de una axiología integracionista que fomenta la participación y consenso con diversos actores en el establecimiento de objetivos y toma de decisiones, tanto científicas como prácticas (Asayama *et al.*, 2019). Por el contrario, las ciencias de la sostenibilidad representan una postura marcadamente intervencionista, la cual valora ante todo la capacidad de acción y transformación efectiva del mundo. Esta perspectiva también es proclive a que los usuarios participen en el proceso de investigación, pero solamente con el objetivo de legitimar la actividad tecnocientífica, no para incluirlos en los procesos de decisión. En cualquier caso, aparecen los valores sociales dentro de su estructura axiológica, que es otro rasgo tecnocientífico, como hemos mencionado anteriormente.

Ambas concepciones convergieron dentro del marco común del *Future Earth* y, bajo la premisa de que la transformación de la ciencia es un requisito previo para la transformación social, el pensamiento solucionista ha acabado por ser predominante en las agendas de investigación (Beck, 2019; Asayama *et al.* 2019). Podríamos decir que la innovación, en tanto transformación de mundo, supone un valor cuyo peso se ha incrementado. Un ejemplo es la iniciativa interna *Knowledge-Action Network on Transformations*, que evidencia la subordinación de los objetivos epistémicos en favor de la innovación y lograr los objetivos de sostenibilidad. Además, este cambio en la estructura de valores y la integración de diversas disciplinas ha ocasionado conflictos internos en cuanto al carácter solucionista de esta nueva convergencia científica, puesto que se está reemplazando la investigación académica tradicional. De modo que podemos distinguir otros dos rasgos típicamente tecnocientíficos: su orientación a la transformación de mundos y el conflicto axiológico continuo en el interior de su agencia plural (Echeverría, 2003).

30

Una de las consecuencias de la cristalización del contrato social de la tecnociencia podría darse en el diseño de agendas de investigación en torno a la geoingeniería solar, que desde los inicios ha sido planteada como vía de investigación (Asayama *et al.*, 2019). El Acuerdo de París de 2015 tenía el objetivo de limitar el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C a través de la reducción de emisiones. Dado que se trata de un objetivo prácticamente imposible de lograr y que es asumido por *Future Earth*, es previsible que pudiera haber una demanda de soluciones alternativas dentro del programa para lograr ese objetivo (Steffen *et al.*, 2018). Por consiguiente, la incorporación de la investigación en geoingeniería solar dentro de la plataforma *Future Earth* es un planteamiento plausible y que cada vez adquiere mayor aceptación (Asayama *et al.*, 2019), sobre todo en los expertos que provienen de países que previsiblemente se verán más afectados por el cambio climático (Dannenbergh y Zitzelsberger, 2019). Los objetivos y la gobernanza de *Future Earth* han sido diseñadas por una élite de científicos, patrocinadores y financiadores. Por eso, junto con el aumento de la complejidad axiológica y las necesidades de bienes y servicios por parte del sector privado, se abre la posibilidad de que este participe directamente en el despliegue de la geoingeniería solar, lo cual conllevaría otro rasgo básico de la tecnociencia: la participación de capital privado.

En los Estados Unidos son varios los inversores privados que han apostado por la geoingeniería de forma indirecta, como en el caso del proyecto ScoPEX, desarrollado por la Universidad de Harvard y financiado por el conocido fundador

de Microsoft: Bill Gates (Stephens y Surprise, 2020). Según David Keith y Peter Irvine, líderes del proyecto, “es cuestión de tiempo que el cambio climático produzca impactos significativos en el medioambiente, la sociedad y la economía global, y por tanto es cuestión de tiempo que los estados posibiliten a otros actores intentar desplegar la geoingeniería solar” (Stavins y Stowe, 2019, p. 1). Otros empresarios también han puesto su atención en la geoingeniería solar, como Niklas Zennstrom o Richard Branson, quien ha financiado los informes de la Royal Society (2009). De modo que hay indicios que hacen pensar que una participación directa del sector privado es deseable por algunos agentes, lo que llevado a cabo generaría un nuevo tecnoparadigma y el desencadenamiento de unas nuevas tecnociencias del clima.

3.3. Anticipar los riesgos en clave axiológica

La interdisciplinaridad del macroproyecto *Future Earth* podría proporcionar un terreno común para la colaboración entre diferentes disciplinas académicas y actores sociales, permitiéndoles codiseñar y coproducir conocimiento en una misma agenda de investigación en torno a la geoingeniería solar. Sin embargo, la asimetría en las relaciones de poder, la representación sesgada y la falta de acceso y capacidad de acción son problemas que por el momento subyacen a esta plataforma tecnocientífica. Ello no obsta para que sea un problema al que convenga anticiparse, especialmente si existen otras iniciativas que promueven la investigación en GRS. Iniciativas cuya acción unilateral en las próximas décadas es una posibilidad cada vez más plausible (C2G2, 2019). De hecho, los indicios anteriormente expuestos han influido en que la gobernanza de la investigación, desarrollo y despliegue de la geoingeniería solar haya ido un asunto al alza dentro de las agendas de los estudios sobre ciencia y tecnología desde hace poco más de diez años.

31

Si bien es cierto que el último informe del IPCC señala que algunas de las aplicaciones de la GRS podrían ser eficaces, aún existe una gran incertidumbre y riesgos considerables, además de limitaciones institucionales y sociales para su implementación. Hasta ahora, la investigación actual en geoingeniería se ha llevado a cabo principalmente a través de modelos y simulaciones computacionales, que ya pronostican los impactos climáticos desiguales que podría ocasionar (Bonnheim, 2010; Marland, 1996). Cabe señalar el caso de América Latina, cuyos modelos prefiguran cambios importantes en los patrones de precipitación, incrementando la posibilidad de sequías en amplias regiones (Straffon, 2018). Ante ello, aún no existe ningún acuerdo internacional sobre el uso de geoingenierías, y los marcos legales de cada país difieren notablemente, por no mencionar el enorme vacío legal que hoy existe sobre estos asuntos. Aunque sea probable que se aumente la atención en este asunto en el próximo informe del IPCC, previsto para 2022, existen múltiples cuestiones políticas, jurídicas, sociales y económicas que aún no han sido suficientemente exploradas. La gobernanza de la investigación, la toma de decisiones o la propiedad intelectual suscitan muchas cuestiones a estimar, teniendo en cuenta las capacidades y limitaciones tanto de actores públicos como privados.

En este sentido, un grupo de investigadores de la Universidad de Oxford han propuesto cinco principios de gobernanza (Rayner *et al.*, 2013) y otro tanto ocurre en el informe *Carnegie Climate Geoengineering Governance Initiative* (G2G2, 2019). Por

su parte, el *Harvard Project on Climate Agreements* acogió, en septiembre de 2018, el taller *Governance of the Deployment of Solar Geoengineering* (Stavins y Stowe, 2019), con la colaboración y apoyo del Programa de Investigación en Geoingeniería Solar de Harvard (HSGRP). En él participaron investigadores STS que trazaron los principales problemas de gobernanza que podría plantear el despliegue de la geoingeniería, proponiendo incluso algunas estrategias inspiradas en el control de armas nucleares o la ciberseguridad. Quizás el panorama más aceptable para todos los países sea la cooperación internacional en base a un pacto de mínimos que especifique las reglas de cuándo y cómo puede o no desplegarse la geoingeniería, como proponen algunos autores (Stavins y Stowe, 2019). Otros autores afirman que se ha prestado demasiada atención a la gobernanza anticipatoria, y poca a las injusticias asociadas a una posible militarización de la geoingeniería solar (Stephens y Surprise, 2020). En cualquier caso, son cuestiones que suscitan conflictos axiológicos a analizar, así como sus posibles alternativas de resolución. Cada una de ellas posee bienes y males a sopesar desde múltiples perspectivas, desde invertir en la geoingeniería tanto como fuera posible hasta prohibir cualquier tipo de investigación. A nuestro modo de ver, todas las opciones conllevan riesgos, y no únicamente ecológicos, sino una pluralidad de riesgos axiológicamente diferentes (Echeverría, 2009b). Los riesgos ecológicos, por ejemplo, incluyen la acidificación de los océanos, el cambio de patrones climáticos regionales o el incremento de lluvia ácida. Mas también existen riesgos epistémicos, militares, tecnológicos, sociales, éticos, políticos, económicos o jurídicos. Y para estimar e identificar todos ellos es conveniente analizar previamente los valores y disvalores subyacentes, dada su estrecha vinculación (Lopez Cerezo y Luján, 2000).

32

En los (co)diseños de agendas de investigación es frecuente la evaluación previa de los objetivos, dilucidando si se adecúan a las normas éticas, medioambientales o a las políticas científicas vigentes, así como a la estrategia de las empresas financiadoras de la investigación. Del mismo modo, es posible evaluar el panorama axiológico subyacente a las acciones tecnocientíficas. Sus sistemas de valores mantienen valores epistémicos, pero a ellos se les superponen otros subsistemas de valores que a veces se contraponen y que además pueden variar según la perspectiva del agente evaluador. Dado que cada vez se torna más probable que la búsqueda de soluciones al calentamiento global incluya a la geoingeniería, es pertinente que las comunidades académicas, científicas y políticas estudien su potencial, así como los mecanismos de gobernanza más viables para su despliegue. Y para ello, es pertinente analizar primeramente los valores implícitos, puesto que la incertidumbre e indeterminación acerca de la probabilidad de un suceso no implican incertidumbre axiológica.¹⁸

A modo de conclusión: nuevos desafíos en la era del Tecnoceno

Los retos que plantea la geoingeniería solar son solo algunos de los muchos que suscita la época del Tecnoceno. Desde la filosofía de la tecnociencia es preciso atender, analizar y evaluar las dinámicas que pueden hacer a la geoingeniería aún

18. Véase Echeverría (2009b).

más real en el futuro próximo, puesto que su existencia en la tecnosfera digital es hoy innegable. El cambio climático tecnogénico es una realidad que ya ha ocasionado el aumento de la temperatura media del planeta en más de 1°C desde finales del siglo XIX, lo cual puede producir daños para la salud, la seguridad, las economías y los ecosistemas (IPCC, 2014). Mientras que la magnitud del impacto futuro aún depende de la capacidad que tengamos de reducir las emisiones de CO₂, hay una parte significativa cuyas consecuencias son ya inevitables. Los esfuerzos por reducir las emisiones han sido menores de lo que hubiera sido posible y deseable y, por otra parte, la última Cumbre del Clima celebrada en diciembre de 2019 en Madrid muestra la gran complejidad de llegar a nuevos acuerdos referidos a los mercados de dióxido de carbono. Como consecuencia, hay muchas razones que hacen pensar en la futura aparición de unas tecnociencias del clima orientadas a la gestión eficiente del calentamiento global, sin perjuicio de que también se procure seguir reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Aquí nos hemos ceñido solo a una de las posibles vías de actuación, basada en las recientes propuestas para ampliar la tecnosfera aérea y promover una gestión de radiación solar (GRS). Sin embargo, también han de estudiarse otras modalidades de geoingeniería como la extracción de dióxido de carbono (EDC), que pretende la expansión de tecnosferas subterráneas y marinas.

Las tecnociencias del clima podrían derivarse tanto de iniciativas privadas como de plataformas tecnocientíficas como *Future Earth*, la cual podría incluir la geoingeniería solar como objetivo de investigación durante los próximos años (Asayama *et al.*, 2019). La incertidumbre acerca de los posibles efectos que ocasionaría su despliegue es alta, pero también es cierto que podría reducir los altos riesgos del cambio climático. A través de modelos y simulaciones computacionales se está tratando de reducir la incertidumbre, mejorando sus capacidades y tratando de contrastarlas con datos reales de experimentaciones limitadas. Actualmente no existe una legalidad clara al respecto y es posible que pueda acabar desplegándose de forma unilateral ocasionando grandes problemas jurídicos, sociales, éticos y geopolíticos (Stavins y Stowe, 2019). Por eso desde los STS del mundo angloparlante ha aumentado la atención en torno a la geoingeniería solar, anticipándose a posibles riesgos y analizando los mecanismos factibles de gobernanza. Por nuestra parte, afirmamos que para identificar y estimar los riesgos es oportuno analizar minuciosamente los valores y disvalores subyacentes a las distintas acciones que se lleven a cabo (Echeverría, 2009b). No es suficiente con medir la probabilidad de que algo suceda. También es necesario medir hasta qué punto es perjudicial, y lo que es tanto o más importante: para quién lo es.

Los estudios iberoamericanos de CTS deberían anticiparse a estas cuestiones desde sus múltiples perspectivas, atendiendo especialmente a los impactos en los ámbitos más vulnerables a riesgos. Como han mostrado Stephens y Surprise (2020), la geoingeniería solar es una propuesta defendida principalmente por agentes asociados a instituciones de élite del hemisferio norte, los cuales son financiados por multimillonarios cada vez más proclives a lógicas militares y liberal-capitalistas. Por ende, tanto la investigación como el despliegue de la geoingeniería requieren ser analizadas teniendo en cuenta las diversas perspectivas axiológicas que pueden orientar las políticas de propiedad intelectual u otros mecanismos de gobernanza de la investigación. Para ello es conveniente proceder empíricamente, a través de

una investigación interdisciplinar en base a estudios de caso y a los protocolos de evaluación utilizados para valorar las actividades de geoingeniería (Echeverría, 2009b). Como agenda de investigación, ello confluye con asuntos de (in)justicia climática, la ética medioambiental, la geopolítica de la tecnociencia o la percepción pública del cambio climático. Todas ellas son cuestiones que, a nuestro modo de ver, atañen a la época del Tecnoceno. No solo porque las tecnociencias sean las principales fuerzas del cambio biofísico del Sistema Tierra, sino porque también constituyen buena parte de las herramientas con las que poder enfrentar los desafíos de nuestro tiempo.

Particularmente, las TIC han propiciado un espacio social —el tercer entorno— en el que se ha desplegado una tecnosfera digital donde podemos interactuar en red y a distancia con las esferas naturales del primer entorno. Probablemente no tengamos más remedio que mantener operativa dicha tecnosfera, dado que las tecnologías han devenido indispensables para nuestra existencia. Sin embargo, nuestras acciones en ella pueden incorporar e incrementar el peso de valores ecológicos. La creación de la *Internet of Nature* (IoN), por ejemplo, supone una oportunidad para desarrollar una tecnociencia ciudadana que ayude a elucidar y comprender las dinámicas de los ecosistemas urbanos, promover la sostenibilidad a través de infoacciones y establecer conexiones entre los sistemas sociales y naturales (Galle *et al.*, 2019). Otro tanto sucede con el proyecto *Big Data Earth*, que basándose en tecnologías de *machine learning* puede llegar a revelar patrones del Sistema Tierra y mejorar la predicción de su comportamiento (Boulton, 2018). Por eso es importante fomentar el acercamiento entre las humanidades digitales y ambientales con las titulaciones técnicas, como ha señalado recientemente de Cózar (2019a, 2019b). Estas tecnohumanidades ambientales requieren ser desarrolladas y difundidas, pues proveen una vía para comprender críticamente la actividad tecnocientífica y evitar la marginalización de las ciencias sociales y humanidades en el despliegue de la tecnosfera.

34

Recuérdese que dicho despliegue conlleva multitud de acciones, por eso lo hemos concebido como un sistema y no como un mero conjunto de artefactos. Las acciones son impulsadas por agentes determinados y muchas veces requieren de grandes infraestructuras que consumen una cantidad elevada y creciente de energía. Ello no obsta para que también permitan conocer el estado del mundo con una calidad y precisión sin precedentes. A través de distintas tecnosferas es posible disponer de un número cada vez mayor de datos acerca de los ecosistemas, los cuales pueden ser recabados, analizados y monitorizados a través de las TIC. El Protocolo de Montreal o el Acuerdo de París, por ejemplo, hubieran sido impensables sin la red global de datos atmosféricos. Y lo mismo ocurre con la aparición de simulaciones computacionales, que no solo proporcionan una evolución con respecto a los métodos tradicionales de cálculo, sino que suponen una práctica distinta a la teorización y experimentación que posibilita la anticipación y el estudio de los diversos estados posibles del Sistema Tierra (Granados y Echeverría, 2019).

Desde el inicio de la Gran Aceleración del siglo XX, no hay duda del beneficio de todos estos avances que, entre otras cosas, han aumentado las capacidades de acción humana de una forma sin precedentes. La esperanza de vida ha aumentado, la mortalidad infantil ha disminuido y la educación es un bien más extendido que en anteriores épocas. No obstante, no solo han de considerarse los bienes del

Tecnoceno. También existen males. La actividad de la tecnosfera es capaz de alterar el Sistema Tierra y llevarlo a modos alternativos de operación que pueden llegar a ser irreversibles y poco deseables para los seres humanos. El deterioro ambiental, el agotamiento de recursos fósiles, la obsolescencia programada o el despliegue de la geoingeniería son algunos de los riesgos que entraña la gobernanza de la tecnosfera. Pero no los únicos. Conviene prever y prevalorar todos ellos, puesto que podrían dificultar la satisfacción de valores tan básicos como la supervivencia.

Financiamiento

El presente trabajo ha sido financiado por el Departamento de Medio Ambiente y Obras Hidráulicas de la Diputación Foral de Gipuzkoa, a través de una beca de investigación en información y comunicación del cambio climático (2019/2020).

Agradecimientos

La presente contribución contiene implícitos varios aportes proporcionados al autor por Aitor Anduaga Egaña, Alejandro Cearreta, José Manuel de Cózar Escalante, Javier Echeverría Ezponda y Jaume Navarro Vives. El autor agradece a todos ellos por sus valiosos consejos y sugerencias.

35

Bibliografía

Arias Maldonado, M. (2018). Antropoceno. La política en la era humana. Madrid: Taurus.

Asayama, S., Sugiyama, M., Ishii, A. y Kosugi, T. (2019). Beyond solutionist science for the Anthropocene: To navigate the contentious atmosphere of solar geoengineering. *The Anthropocene Review*, 6(1-2), 19-37.

Baskin, J. (2019). *Geoengineering, the Anthropocene and the End of Nature*. Cham: Palgrave Macmillan.

Beck, S. (2019). Coproducing Knowledge and Politics of the Anthropocene: The Case of the Future Earth Program. En F. Biermann y E. Löwbrand (Eds.), *The Practices of Political Study in the Anthropocene (191-211)*. Cambridge: Cambridge University Press.

Bonnheim, N. B. (2010). History of climate engineering. *WIREs Climate Change*, 1(6), 891-897.

Boulton, G. (2018). The challenges of a Big Data Earth. *Big Earth Data*, 2(1), 1-7.

Byers, H. R. (1974). History of weather modification. En W. N. Hess (Ed.), *Weather and climate modification* (3-44). Nueva York: Wiley.

C2G2 (2019). *Geoingeniería: la necesidad de gobernanza*. Nueva York: Iniciativa Carnegie para la Gobernanza de la Geoingeniería Climática.

Cearreta, A. (2015). La definición geológica del Antropoceno según el Anthropocene Working Group (AWG). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23(3), 263-271.

Cera, A. (2017). The Technocene or Technology as (Neo)Environment. *Techné: Research in Philosophy and Technology*, 21(2-3), 243-282.

Cózar Escalante, J. M. (2019a). Ingenieros del Antropoceno digital: la enseñanza de las ingenierías en una época incierta. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad –CTS*, 14(41), 185-196.

Cózar Escalante, J. M. (2019b). *El Antropoceno. Tecnología, naturaleza y condición humana*. Madrid: Los Libros de la Catarata.

Cressey, D. (2012). Cancelled project spurs debate over geoengineering patents – SPICE research consortium decides not to field-test its technology to reflect the Sun's rays. *Nature*. 485(7399), 429.

36 Crutzen, P. J. y Stoermer, E. F. (2000). The 'Anthropocene'. *Global Change Newsletter*, 41, 17-18.

Crutzen, P. (2006). Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change*, 77, 211-219.

Dannenberg A. y Zitzelsberger, S. (2019). Climate experts' views on geoengineering depend on their beliefs about climate change impacts. *Nature Climate Change*, 9, 769–775.

Doel, R. (2003). Constituting the postwar earth sciences: The military's influence on the environmental sciences in the USA after 1945. *Social Studies of Science*, 33(5), 635-666.

Echeverría, J. (1999). *Los señores del aire: Telépolis y el Tercer Entorno*. Barcelona: Destino.

Echeverría, J. (2003). *La revolución tecnocientífica*. Madrid: Fondo de Cultura Económica.

Echeverría, J. (2009a). Interdisciplinaridad y convergencia tecnocientífica nano-bio-info-cogno. *Sociologías*, 22, 22-53.

Echeverría, J. (2009b). Los riesgos de la globalización. En J.L. Luján y J. Echeverría (Eds.), *Gobernar los riesgos: ciencia y valores en la sociedad del riesgo* (187-206). Madrid: Editorial Biblioteca Nueva.

Echeverría, J. (2015). De la filosofía de la ciencia a la filosofía de las tecno-ciencias e innovaciones. *Revista iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad –CTS*, 10(28), 109-119.

Ellis, E. C. (2015). Ecology in an anthropogenic biosphere. *Ecological Monographs*, 85(3), 287–331.

Feichter, J. y Quante, M. (2017). From predictive to instructive: Using models for geoengineering. En M. Heymann, G. Gramelsberger y M. Mahony (Eds.), *Cultures of Prediction in Atmospheric and Climate Science. Epistemic and Cultural Shifts in Computer-based Modelling and Simulation (178-194)*. Nueva York: Routledge.

Fleming, J. R. (2010). *Fixing the sky: The checkered history of weather and climate control*. Nueva York: Columbia University Press.

Fleming, J. R. (2004). Fixing the climate: Military and civilian schemes for cloud seeding and climate engineering. En L. Rosner (Ed.), *The technological fix: How people use technology to create and solve problems (X–XX)*. Londres: Taylor & Francis.

Fleming, J. R. (2007). The Climate Engineers. *Wilson Quarterly*, 31, 46-60.

Forman, P. y Sánchez-Ron, J. M. (Ed.) (1996). *National Military Establishments and the Advancement of Science and Technology: Studies in Twentieth-Century History*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

37

Future Earth (2014). *Strategic Research Agenda*. París: International Council for Science.

Galle, N. J., Notoslawski, S.A. y Pilla, F. (2019). The Internet of Nature: How taking nature online can shape urban ecosystems. *The Anthropocene Review*, 6(3), 279-287.

Gärdebo, J., Marzecova, A. y Knowles, G. (2017). The orbital technosphere: The provision of meaning and matter by satellites. *The Anthropocene Review*, 4(1), 44-52.

Greenpeace (2017). *Clicking Clean 2017: ¿Quién está ganando la carrera para construir un internet verde?* Recuperado de: www.greenpeace.es.

Haff, P. K. (2013). Technology as a geological phenomenon: implications for human well-being. En C. N. Waters, Zalasiewicz J, M. Williams et al. (Eds.), *A stratigraphical basis for the Anthropocene*. The Geological Society of London (301-309). Londres: Special Publications.

Harper, K. C. (2017). *Make it Rain: State Control of the Atmosphere in Twentieth Century America*. Chicago: University of Chicago Press.

Harper, K. C. (2008). Climate control: United States weather modification in the cold war and beyond. *Endeavour*, 32(1), 20–26.

Heymann, M. y Achermann, D. (2018). From Climatology to Climate Science in the Twentieth Century. En S. White, C. Pfister y F. Mauelshagen (Eds.), *The Palgrave Handbook of Climate History (605-626)*. Londres: Palgrave McMillan.

Heymann, M. y Hundebøl, R. (2017). From heuristic to predictive: Making climate models into political instruments. En M. Heymann, G. Gramelsberger y M. Mahony (Eds.), *Cultures of Prediction in Atmospheric and Climate Science. Epistemic and Cultural Shifts in Computer-based Modelling and Simulation (100-119)*. Nueva York: Routledge.

Heymann, M., Gramelsberger, G. y Mahony, M. (2017). Introduction. En M. Heymann, G. Gramelsberger y M. Mahony (Eds.), *Cultures of Prediction in Atmospheric and Climate Science. Epistemic and Cultural Shifts in Computer-based Modelling and Simulation (1-17)*. Nueva York: Routledge.

Hornborg, A. (2015). The Political Ecology of the Technocene: Uncovering Ecologically Unequal Exchange in the World-System. En C. Hamilton, C. Bonneuil y F. Gemenne (Eds.), *The Anthropocene and the Global Environmental Crisis: Rethinking Modernity in a New Epoch (57-69)*. Nueva York: Routledge.

IPCC (2019). The Intergovernmental Panel on Climate Change. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/>.

38

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

Josephson, P. (2011). Technology and the conquest of the Arctic. *The Russian Review*, 70(3), 419–439.

Josephson, P. y Zeller, T. (2003). The transformation of nature under Hitler and Stalin. En Walker M. (Ed.), *Science and Ideology: A Comparative History (124–152)*, Londres: Routledge.

Keith, D. W. (2000). Geoengineering the climate: History and prospect. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 245-284.

Lamb, H. (1971). Climate-engineering schemes to meet a climatic emergency. *Earth-Science Reviews*, 7, 87-95.

López Cerezo, J. A. y Luján, J. L. (2000). *Ciencia y política del riesgo*. Madrid: Alianza.

Marchetti, C. (1977). On geoengineering and the CO2 problem. *Climatic Change*, 1, 59-68.

Marland, G. (1996). Could we/should we engineer the Earth's climate? *Climatic Change*, 33(3), 275–278.

McNeill, J. R. y Engelke, P. (2016). *The great acceleration: An environmental history of the Anthropocene since 1945*. Cambridge: Harvard University Press.

McNeill, J. R. y Unger, C. R. (Eds.) (2010). *Environmental histories of the Cold War*. Cambridge: Cambridge University Press.

NASA (2007). *Workshop Report on Managing Solar Radiation*. Moffett Field: Ames Research Center.

Philander, S. G. (Ed.) (2008). *Encyclopedia of global warming and climate change*. Thousand Oaks: SAGE.

Ortega y Gasset, J. (1939). *Meditación de la técnica*. Madrid: Biblioteca Nueva.

Quintanilla, M. A. (2017). *Tecnología: un enfoque filosófico y otros ensayos de filosofía de la tecnología*. México: Fondo de Cultura Económica.

Rayner S., Heyward C., Kruger T., Pidgeon, N., Redgwell, C. y Savulescu, J. (2013). *The Oxford Principles*. *Climatic Change*, 121(3), 499-512.

Rispoli, J. y Grinevald, J. (2018). Vladimir Vernadsky and the Co-evolution of the Biosphere, the Noosphere, and the Technosphere. *Technosphere Magazine*. Recuperado de: <https://technosphere-magazine.hkw.de/p/Vladimir-Vernadsky-and-the-Co-evolution-of-the-Biosphere-the-Noosphere-and-the-Technosphere-nuJGbW9KPxrREPxXxz95hr>.

39

Robinson, E. y Robbins, R. C. (1968). *Sources, abundance, and fate of gaseous atmospheric pollutants*. Estados Unidos: Stanford Research Institute.

Shaw, D. J. B. (2015). Mastering nature through science: Soviet geographers and the Great Stalin Plan for the transformation of nature, 1948–53. *The Slavonic and East European Review*. 93(1), 120–146.

Sloterdijk, P. (2016). *Was geschah in 20. Jahrhundert?* Berlin: Suhrkamp Verlag.

Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Graftney, O. y Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81-98.

Steffen, W., Rockström, J. y Richardson, K. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 11(33), 8252–8259.

Stephens, J. y Surprise K. (2020). The hidden injustices of advancing solar geoengineering research. *Global Sustainability*, 3(E2), 1-6.

Spice Project (2013). *Stratospheric Particle Injection for Climate Engineering*. Recuperado de: <http://www.spice.ac.uk/>.

Stavins, R. N. y Stowe, R. C. (Eds.) (2019). *Governance of the Deployment of Solar Geoengineering*. Cambridge: Harvard Project on Climate Agreements.

Straffon, A. (2018). *Manejo de la Radiación Solar: implicaciones para América Latina*. Recuperado de: www.etcgroup.org.

Subcommission on Quaternary Stratigraphy (2019). *Working Group on the 'Anthropocene'*. Recuperado de: <http://quaternary.stratigraphy.org/working-groups/anthropocene/>.

The Royal Society (2009). *Geoengineering the climate. Science, governance and uncertainty*. Londres: RS Policy Document.

Trischler, H. (2017). El Antropoceno, ¿un concepto geológico o cultural, o ambos? *Desacatos*, 54, 40-57.

Uekötter, F. (2010). The end of the Cold War: A turning point in environmental history?. En J. R. McNeill y C. R. Unger (Eds.), *Environmental histories of the Cold War (343–352)*. Cambridge: Cambridge University Press.

Weart, S. P. (2011). *Climate modification schemes*. Recuperado de: <http://www.aip.org/history/climate>

40

Zalasiewicz, J., Williams, M., Waters, C. N., Barnosky, A. D., Palmesino, J., Rönnskog, A. S., Edgeworth, M., Neal, C., Cearreta, A., Ellis, E. C., Grinevald, J., Haff, P., Ivardosul, J. A., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J. R., Odada, E., Oreskes, N., Price, S. J., Revikin, A., Steffen, W., Summerhayes, C., Vidas, D., Wing, S. y Wolfe, A. P. (2017). Scale and diversity of the physical technosphere: A geological perspective. *The Anthropocene Review*, 4(1), 9-22.

Zalasiewicz, J., Williams, M., Waters, C. N., Barnosky, A. D. y Haff, P. (2014). The technofossil record of humans. *The Anthropocene Review*, 1(1), 34-43.

Zikeev, N. T. y Doumani, G. A. (1967). *Weather modification in the Soviet Union, 1945–1966: A selected annotated bibliography*. Washington DC: Library of Congress Science and Technology Division.

Cómo citar este artículo

Granados Mateo, J. L. (2021). Futuros tecnocientíficos: nuevos desafíos en torno a la geoingeniería solar. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad — CTS*, 16(46), 11-40.