

Durabilidad humana y la educación química

Carlos Amador-Bedolla*

ABSTRACT (Human durability and chemical education)

Two hundred years of intense economical growth, centrally driven by abundant access to sources of inexpensive energy, have allowed the establishment of a social paradigm that has directed the development of all social, economic, educational, scientific and technological aspects of our society. However, during the past fifty years, evidence has accumulated of our displacement towards several planetary boundaries as a result of the effects of the application of this paradigm, thus alerting us of the impossibility of its continuance. Sustainability science is a rational attempt of adopting an alternative paradigm that allows to deviate from these planetary boundaries. The relative autonomy of universities and its influence on the creation of cultural capital make them a forceful participant in the diffusion and application of the science of sustainability. Chemistry has an important role in solving some of the most urgent problems of our present situation.

KEYWORDS: sustainability science, planetary boundaries, sustainability in higher education and scientific research

I. Introducción

A posteriori será cada vez más difícil de creer que nos hayamos tardado tanto, ya no en arreglar, sino tan siquiera en reconocer los problemas a los que se enfrentó la humanidad al iniciar el siglo XXI. El ejemplo más difícil de entender, al menos en las cercanías de la primera década del siglo, es la existencia de una prolongada discusión sobre la realidad de nuestro acercamiento a las fronteras planetarias (Rockström *et al.* 2009a, 2009b) y, en particular, a la del cambio climático (Wijkman y Rockström, 2012). Se requerirá, sin duda, mucha teoría psicológica que explique por qué una influyente fracción de nuestra sociedad luchó con tanto ahínco para negar lo que se verá entonces como una obviedad: los gases de efecto invernadero absorben radiación electromagnética y la reorientan –a diferencia del efecto albedo que la refleja, regresándola por donde vino– aumentando la fracción de ésta que queda encerrada en la atmósfera terrestre; mayor energía en la atmósfera, mayor temperatura promedio. Así de fácil, así de claro. Pero nuestra inefable especie ha dividido la opinión al respecto durante los últimos 20 años, primero, entre quienes ignoran la existencia del problema y quienes lo atienden, y segundo, entre quienes lo atienden, en los que reconocen lo obvio y aquellos que dedican su esfuerzo a negarlo. Veinte años discutiendo al respecto con el efecto neto de que cualquier esfuerzo probable por resolver este problema será iniciado al menos 20 años después, cuando la concentración de dióxido

de carbono en la atmósfera es ya 394 ppm en lugar de las 356 ppm de 1993 (incrementos de 41% y 27%, respectivamente con respecto al valor estimado en la atmósfera preindustrial de 280 ppm (Solomon *et al.*, 2007)).

Pero los retos que enfrenta la humanidad en la actualidad no se reducen a los asociados y generados por el cambio climático y su discusión, ni a los que se definen, más ampliamente, en el conjunto de las fronteras planetarias. Originada por observaciones ecológicas, la pregunta sobre la sustentabilidad¹ de las actividades humanas, en particular las relacionadas con las formas de vida mayoritariamente imperantes en los últimos 200 años, abarca en la actualidad preguntas relevantes en multitud de disciplinas de lo humano; y al mismo tiempo que ha ampliado su profundidad y su alcance en las relacionadas con lo comúnmente conocido como asuntos ecológicos, se ha convertido en una importante forma de analizar múltiples situaciones globales que incluyen aspectos sociales, económicos, científicos y gubernamentales. El presente artículo tiene la intención de explorar estas consideraciones emergentes. En la sección II se hace un breve recuento de la situación actual en la sustentabilidad tradicional –ambientalista y ecologista– a través del ejemplo de las fronteras planetarias de Rockström (Rockström *et al.*, 2009a, 2009b). En la sección III, se menciona el problema esencial de la sustentabilidad de la obtención de energía primaria. En la sección IV, con el reconocimiento fundamental de nuestro amateurismo en esos temas, se menciona la sustentabilidad en aspectos sociales, económicos y gubernamentales. En la sección V se discute

Artículo invitado para el número especial sobre Educación Química y Sostenibilidad.

*Departamento de Física y Química Teórica, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.

Correo electrónico: carlos.amador@unam.mx

¹ Se discute el empleo de las palabras sustentabilidad, sostenibilidad –ambas provenientes de *sustainability*– y durabilidad –de *durabilité*. Creo que sustentabilidad se está imponiendo al menos en México, aunque me gusta durabilidad por las ideas que sugiere de manera inmediata.

la necesidad de incorporar la sustentabilidad en la modernización necesaria de la Universidad, tanto para sus labores de investigación como para las de docencia. En la sección VI se presentan los ejemplos de tres problemas de sustentabilidad que pueden ser atendidos, de manera especialmente productiva, por la química. En la sección VII se discuten algunas consecuencias de estas ideas.

II. La sustentabilidad ecológica y ambientalista

En 1962 la bióloga marina Rachel Carson publicó *Primavera silenciosa*, el libro que se asocia con el inicio del movimiento ecologista y ambientalista moderno. El libro trata particularmente sobre el empleo de pesticidas en la industria agrícola y sus efectos dañinos sobre diversas especies, que incluyen relevantemente a las aves y a los humanos. Se le considera determinante en la prohibición, primero en países desarrollados y posteriormente en todo el mundo, del empleo masivo de DDT. Como en otros casos típicos, el tema se refiere al empleo de un tipo limitado de sustancias químicas con objetivos relativamente limitados –control de plagas–, lo que permite una discusión más o menos clara entre héroes y villanos bien definidos: las malvadas corporaciones, en su afán de obtener inmensas ganancias, están dispuestas a poner en riesgo la sustentabilidad de algunas especies y a dañar la salud humana, los héroes pueden evitar esto sin mayores sacrificios a su forma de vida.

Casi medio siglo después, en 2009, Joachim Rockström (Rockström *et al.*, 2009a, 2009b) lideró el grupo de investigadores que propuso la designación de nueve fronteras planetarias: la definición de los procesos biofísicos que son cruciales para el desarrollo estable de la Tierra y la determinación del riesgo de sobrepasar ciertas fronteras asociadas con esos procesos. La selección original de estos procesos biofísicos contiene:

1. cambio climático
2. destrucción de la capa de ozono
3. acumulación de aerosol atmosférico
4. acidificación del océano
5. consumo de agua dulce
6. contaminación química
7. uso agrícola del suelo
8. pérdida de la biodiversidad
9. ciclos de nitrógeno y de fósforo

Tomemos como ejemplo de estas fronteras los ciclos de nitrógeno y de fósforo –de estrecha relación con la química–. Como es bien sabido, el empleo de nitrógeno y de fósforo en la industria agropecuaria mundial de la actualidad es masivo, lo que permite, por un lado, la producción de alimentos para garantizar la vida de más de 7 mil millones de personas y provoca, por el otro, a través de su abundante empleo –por encima de sus necesidades como “reactivo limitante”– su acumulación en aguas naturales –ríos, lagos, mares– y la consecuente eutrofización. El nitrógeno, a diferencia del

fósforo, se produce abundantemente gracias al invento químico del proceso de Haber-Bosch que permite “fijar” todo el que haga falta de la atmósfera en la forma de amoníaco, mientras que el fósforo es una fuente mineral que existe, concentrado, en limitadas cantidades y que, paradójicamente, puede faltar para su empleo en la agricultura a pesar de su abundancia en aguas naturales (Beardsley, 2011). Rockström *et al.* estiman que la cantidad de nitrógeno ha rebasado la que permite la existencia de un *espacio operativo seguro* para la humanidad. Esto significa que, o reducimos esa cantidad, o... soportamos las consecuencias de esta abundancia, consecuencias cuyos efectos se empiezan a estimar a través del continuo desarrollo de las disciplinas científicas correspondientes.

Las fronteras planetarias de Rockström muestran una modificación fundamental en los temas centrales de la ecología y el ambientalismo con respecto a los de 50 años atrás, ejemplificados en el trabajo de Carson: los temas actuales son globales y revelan que sus causas últimas son responsabilidad de todos los seres humanos en mayor o menor medida (Wijkman y Rockström, 2012). O, dicho de otra manera, ahora es más difícil entender los problemas ecológicos y ambientalistas desde la dualidad de los malos y los buenos, el *dictum* moderno es más bien “¿eres *Homo sapiens*?, ah, ¡entonces eres responsable!”

III. La generación de energía primaria

Se ha mencionado a la energía como la *única* moneda corriente (Smil, 2008). La Revolución Industrial –con todo lo que se pueda decir sobre los grandes descubrimientos científicos e inventos tecnológicos que la definen– ha sido impulsada y se mantiene gracias a la disponibilidad de energía barata en las cantidades que han hecho falta hasta la fecha. El consumo de energía de la humanidad ha aumentado más de 10 veces en los últimos 100 años –la población ha aumentado solamente cuatro veces–, aumento que ha dependido principalmente de los combustibles fósiles: 87% de la energía primaria se obtiene de esta combustión, con contribuciones repartidas entre gas natural (24%), carbón mineral (30%), y petróleo (33%), combustibles que comparten los efectos atmosféricos mencionados anteriormente. Se ha argumentado retóricamente sobre los avances en la intensidad del consumo energético ya que cada vez –en algunos países solamente– cuesta menos energía el aumento de un punto porcentual del producto interno bruto, argumento retórico porque el consumo de energía aumenta aunque mejore la intensidad (Le Pen y Sévi, 2010). La fracción de la energía primaria proveniente de fuentes convencionales –combustibles fósiles más energía nuclear– fue de 87.6% en 1973 y de 86.8% en 2010, para un decremento de 0.8%; sin embargo, toda vez que en 1973 se consumieron 6,107 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe, por sus siglas en inglés) y en 2010, 12,717 Mtoe, en términos absolutos el aumento ha sido de 106.3% (Dangerman y Schellnhuber, 2013).

Este problema con la generación de energía primaria tiene dos aspectos, el mencionado de sus consecuencias en la generación de gases de efecto invernadero y el de su origen fósil: las fuentes de combustibles mencionadas se formaron en una escala de tiempo seis órdenes de magnitud más larga que aquella en la que se están consumiendo, lo que significa que son finitos, no renovables, y que se van a acabar. Su función como moneda corriente de la modernidad está condenada a suspenderse y la continuidad de nuestra forma de vida depende obligatoriamente de la obtención de energía primaria por otros medios.

Esta otra obviedad ha sido también ferozmente debatida por una influyente fracción de la humanidad, en particular en las discusiones originadas por el concepto del Pico de Hubbert sobre la disponibilidad de petróleo (Kleiner, 2009). Por otro lado, la imposible sustentabilidad de las energías fósiles ha ampliado el concepto por fuera de las ideas ecológicas y ambientales originarias, y el descubrimiento de nuevas fuentes de energía se ha incorporado como uno de los problemas centrales de la sustentabilidad de las formas de vida –sociales y productivas– de la modernidad.

Existe una amplia discusión sobre cuáles pueden ser las fuentes de energía que contribuyan efectivamente a la durabilidad de la humanidad en situaciones semejantes a las que el consumo de combustibles fósiles ha permitido (Brown *et al.*, 2011). El concepto de huella energética sirve para iluminar la situación actual. La huella energética es una estimación del área en la superficie de la Tierra requerida para generar una unidad de energía en cierto tiempo. De nuevo, los combustibles fósiles son excepcionalmente densos y su huella energética es muy pequeña: la plataforma petrolera *Deepwater Horizon* (National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill, 2011), de infame memoria, tenía un área de 9 mil metros cuadrados y alcanzó a extraer al menos 4 millones de barriles de petróleo en tres meses, para una huella energética definida por el inverso de al menos 300,000 W/m². Se han estimado las huellas energéticas de las fuentes de energía renovables: energía geotérmica 0.017 W/m², bioenergía 0.5 W/m², energía eólica 2-3 W/m², energía fotovoltaica 5-20 W/m² (MacKay, 2009). El potencial de estas fuentes de energía para remplazar a los combustibles fósiles dadas las demandas actuales de energía se ilustra en la figura 1, en la que se relaciona el consumo de energía por persona con la densidad poblacional actual de 215 países. La densidad de consumo actual difícilmente podrá ser satisfecha por las fuentes renovables de energía.

El uso actual de energía no es sustentable. Recientemente se inicia la propuesta de las ideas que pueden dirigirnos hacia un empleo de energía con visos de sustentabilidad. Por ejemplo, el trabajo de Dangelman y Schellnhuber propone el establecimiento de políticas públicas que fomenten la adopción de fuentes renovables, con la intención de revertir el estado actual de la economía energética, en el que entre 2007 y 2010 las energías convencionales recibieron 495 mil millones de dólares en subsidios frente a los 61 mil

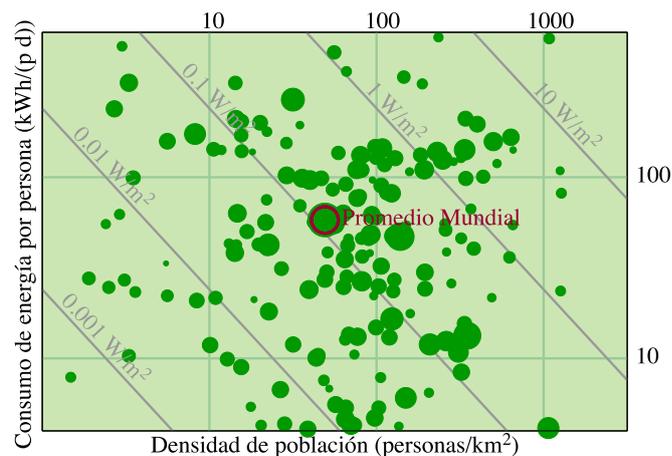


Figura 1. Consumo energético por persona en 215 países como función de la densidad de población. Las líneas rectas corresponden a densidad de energía constante (W/m²). Los países que se localizan por encima de la línea correspondiente a 1 W/m² necesitarían emplear al menos la tercera parte de su territorio total para obtener la energía que consumen a partir de turbinas eólicas. (Elaboración del autor a partir de la idea de MacKay, 2009.)

millones otorgados a las energías renovables, un factor de 8.1 a 1 (Dangelman y Schellnhuber, 2013). La modificación de nuestras expectativas de crecimiento económico –que incluya la posibilidad de aceptar una disminución de la actividad económica– se empieza a considerar (van den Bergh, 2013).

IV. Sustentabilidad social, económica y política

El principio fundacional de la economía es estudiar “cómo decide la gente sobre el uso de recursos limitados y escasos para satisfacer sus ilimitados deseos” (Skidelsky y Skidelsky, 2012). Pero esta fundación tuvo lugar en un mundo vacío de pocos seres humanos, con poca infraestructura instalada y un acceso inadecuado a los bienes, en donde se requería favorecer la concentración de la riqueza para aumentar la inversión y el consumo; concentración que garantizaría el crecimiento aun a pesar de posponer la distribución equitativa –ya que ésta frena el crecimiento. Ciertamente el paradigma económico ha permitido un crecimiento extraordinario de la riqueza al igual que su extrema concentración. Pero, adicionalmente, el éxito del crecimiento económico ha modificado el mundo para convertirlo en un mundo lleno, en el que la infraestructura instalada es abundante y en el que los límites en la disponibilidad de recursos naturales cuestionan la sustentabilidad. El principio económico es, por sí mismo, improrrogable (Beddoe *et al.*, 2009).

Sin embargo el principio social, que hace uso del paradigma económico y que nos está acercando a las fronteras planetarias, tiene muchas deudas con sus promesas originarias: el mundo no es igualitario, la pobreza cubre a una amplia fracción de la humanidad, los derechos humanos no se aplican universalmente. En palabras de los recipientes

del Blue Planet Prize (The Blue Planet Prize laureates, 2012), nos debemos aún:

(...U)n mundo con un comportamiento ético con respecto a la pobreza y a los recursos naturales, un mundo sustentable tanto ambiental como social y económicamente, en el que los retos del cambio climático, la pérdida de la biodiversidad y las desigualdades sociales se han atendido exitosamente. Éste es un sueño que se puede lograr, pero el sistema actual es muy defectuoso y nuestra conducta actual no se dirige en ese sentido.

La combinación de los problemas relacionados con la sustentabilidad en sus aspectos ambientales y ecológicos originales, los de las otras fronteras planetarias que enfrentamos –por ejemplo el de las fuentes de energía primarias–, el paradigma económico y sus deudas sociales han dirigido el desarrollo de la ciencia de la sustentabilidad (Kates, 2011). Su definición está marcada por los problemas que atiende más que por las disciplinas que emplea. Sus cuestiones centrales incluyen (Kates *et al.*, 2001):

- ¿cómo es la dinámica de la interacción entre los sistemas ambientales y los sistemas humanos?
- ¿cómo se pueden incorporar estas interacciones en modelos y conceptos que integren el sistema terrestre, el desarrollo social y la sustentabilidad?
- ¿cómo afectan las tendencias a largo plazo en el ambiente y el desarrollo a las interacciones entre la naturaleza y la sociedad?
- ¿qué incentivos pueden mejorar la capacidad social para mejorar la interacción entre naturaleza y sociedad en una dirección sustentable?
- ¿qué tipo de ciencia y tecnología puede acoplarse con mayor eficiencia para alcanzar objetivos sustentables?

La ciencia de la sustentabilidad incrementa su fuerte presencia académica (Clark, 2007). Y sus más recientes aportaciones incluyen temas de uso de la tierra (Turner *et al.*, 2007), medicina y salud (Bloom, 2007), ciencias sociales (Ostrom, 2007), pobreza (Kates y Dasgupta, 2007), ecología (Daily y Matson, 2008), ciencias atmosféricas (Schellnhuber, 2009), escasez de agua (MacDonald, 2010), historia (Butzer y Endfield, 2012), agricultura y salud (Dube *et al.*, 2012) y ciencias de la tierra (Schlosser y Pfirman, 2012).

V. Sustentabilidad en la academia

La academia es también una institución fundada en el principio social del crecimiento permanente, o equivalentemente, en el principio social basado en un mundo vacío. Ante el reconocimiento de la etapa presente de la humanidad como una que ocurre en un mundo lleno, la academia es una institución que debe adaptarse a condiciones distintas a las que determinaron su estructura actual.

La estructura educativa de la academia actual está basada en la especialización. Y la especialización ha permitido

que los requisitos esenciales para la pertenencia a una profesión se hayan conservado prácticamente constantes –con las variaciones propias de la adopción de nuevas tecnologías, pero con los mismos fundamentos– en los últimos 50 años. Los departamentos académicos de una escuela de Química, por ejemplo, conservan la división que definió la actualidad de hace 50 años: orgánica, inorgánica, fisicoquímica, bioquímica y analítica. Pero los problemas fundamentales de la actualidad no encajan necesariamente con esa división. La ciencia de la sustentabilidad requiere formaciones más amplias, interdisciplinarias desde el principio, con potencial para realizarse como transdisciplinarias.

Whitesides, uno de los investigadores académicos más influyentes de la química (Thomson-Reuters, 2011), opina que conservar la estructura actual de la academia en química no es la opción correcta (Whitesides y Deutch, 2011). Los problemas sociales actuales son muy complejos para ser atendidos por una combinación de las disciplinas establecidas. La idea de que resolver problemas prácticos vulgariza la ciencia es errónea; por un lado se debe recordar que muchos de los descubrimientos fundamentales de la química se lograron a partir de problemas prácticos –catálisis, polímeros–; por otro, insistiremos en que la situación actual de la humanidad requiere la solución de problemas prácticos –para la química: producción, almacenamiento y conservación de energía y agua, manejo del dióxido de carbono, por ejemplo (Whitesides y Crabtree, 2007).

Aspuru-Guzik sugiere que el privilegio del que disfrutó la academia en el pasado cercano, en el que los recursos sociales invertidos en la investigación científica podían ser orientados al estudio de la ciencia más abstracta, debe cambiar en la actual situación de cercanía a las fronteras planetarias por la que atraviesa la humanidad, de tal manera que el esfuerzo científico sea dirigido principalmente a la atención de los problemas actuales, quizás orientados por la ciencia de la sustentabilidad (Aspuru-Guzik, 2013).

Algunas instituciones académicas han iniciado programas educativos en la dirección de la ciencia de la sustentabilidad (Segalàs *et al.*, 2009; Ferrer-Balas *et al.*, 2010; Jerneck *et al.*, 2010). Una magnífica fuente de documentación sobre ciencia de la sustentabilidad es la antología mantenida por el Centro de Desarrollo Internacional de la Universidad de Harvard (Kates, 2010).

VI. Tres problemas químicos

Y, ¿por dónde empezamos los químicos? Existen al menos tres problemas de fronteras planetarias que requieren soluciones químicas: producción, almacenamiento y conservación de energía; producción, almacenamiento y conservación de agua, y manejo del dióxido de carbono.

El problema de la energía fue mencionado en la sección III: la permanencia de la demanda actual de energía en ausencia –o reducción– del empleo de combustibles fósiles, solo es posible mediante el empleo de energía solar. Se estudian tres posibilidades de adaptación de energía solar: la

generación de energía eléctrica a partir de celdas fotovoltaicas (Hachmann *et al.*, 2011), la generación de energía –elétrica o mecánica– a partir de energía solar térmica (Hepbasli, 2008) y la generación de energía a partir de la combustión de hidrógeno producido por hidrólisis de agua, proceso que ha sido llamado atractivamente fotosíntesis artificial (Lewis y Nocera, 2006; Amador, 2012).

La síntesis y el tratamiento de agua es un problema central en la atención de una de las fronteras planetarias originales. Los abordajes a través de la química se pueden dividir entre las aplicaciones de técnicas químicas tradicionales para su producción y tratamiento (Chen, 2004) y las novedosas que plantean la necesidad de comprender con mayor profundidad las características fisicoquímicas fundamentales del agua en sus múltiples presentaciones en la atmósfera de la tierra (Bartels-Rausch, 2013).

El almacenamiento de CO₂ para evitar su difusión a la atmósfera se estudia cuando menos de dos maneras, como resultado de la modificación del proceso de combustión para generar energía –captura de CO₂ en la precombustión (Steenveveldt *et al.*, 2006)– y como aislamiento del gas generado, compresión supercrítica y acumulación mediante adsorción o absorción (Pires *et al.*, 2011).

No es sorprendente que muchas de las técnicas empleadas en la búsqueda de soluciones a estos problemas de fronteras planetarias provengan del arsenal acumulado por la investigación química realizada dentro del paradigma actualmente establecido. Previsiblemente también, el desarrollo ulterior de los aspectos químicos de la ciencia de la sustentabilidad fortalecerá aún más sus posibilidades de contribuir a la solución de estos problemas.

VII. Conclusiones

Permítase la referencia al paradigma central de la humanidad en la época actual, a partir de la Revolución Industrial, como el paradigma de la sociedad del antropoceno.² Éste es caracterizado por la voluntad y la capacidad humana de mantener el crecimiento permanente de sus actividades, medidas principalmente por el consumo de bienes naturales por un lado y el desecho de residuos por el otro, con el propósito de mejorar sus condiciones de vida. Este paradigma ha regido el desarrollo de múltiples aspectos sociales, económicos, de educación, de salud, científicos, tecnológicos, etcétera, que, necesariamente, favorecen su objetivo esencial –crecimiento permanente de las actividades humanas– y que provocan los efectos correspondientes –consumo y desecho crecientes. Además de que tal actividad es esencialmente insostenible en un mundo finito, múltiples evidencias actuales revelan nuestro acercamiento a fronteras planetarias que impedirán su continuación. El remplazo

de tal paradigma por uno que no choque con esas fronteras es indispensable o, si se prefiere, inevitable. La ciencia de la sustentabilidad representa un proyecto de realización racional de una propuesta de paradigma alternativo. Sus objetivos la hacen obligatoriamente transdisciplinaria y holística. La percepción de urgencia de la situación la hace obligatoria. Las universidades, por su relativa independencia de las obligaciones del paradigma actual por un lado y por su influjo en la creación de la cultura por el otro, pueden jugar un papel fundamental en su difusión y aplicación.

Richard Kool (2013) destaca la similitud de quienes alertan sobre el efecto de nuestro acercamiento a las fronteras planetarias y la necesidad de la sustentabilidad con los profetas de la tradición bíblica. Cabe recordar que un profeta no pretende predecir una catástrofe futura, sino que trata de evitarla, porque una profecía que se cumple es un fracaso.

Si bien recordamos el Viejo Testamento cuando pensamos en profetas, al parecer los profetas siempre están entre nosotros, y podemos elegir si prestamos atención a lo que nos dicen para considerar el presente, pensar en el futuro y tomar nuestras propias decisiones, individual o colectivamente. O podemos elegir ignorarlos. (Kool, 2013)

Referencias

- Amador, C., La fotosíntesis artificial: la propuesta química que puede salvar al mundo, *Anuario Latinoamericano de Educación Química*, **27**, 195–201, 2012.
- Aspuru-Guzik, A., comunicación personal, 2013.
- Bartels-Rausch, T., Ten things we need to know about ice and snow, *Nature*, **494**, 27–29, 2013.
- Beardsley, T. M., Peak Phosphorous, *BioScience*, **61**, 91–, 2011.
- Beddoe, R., Costanza, R., Farley, J., Garza, E., Kent, J., Kubiszewski, I., Martinez, L., McCowen, T., Murphy, K., Myers, N., Overcoming systemic roadblocks to sustainability: The evolutionary redesign of worldviews, institutions, and technologies, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**, 2483–2489, 2009.
- Bloom, B. N., Sustainability health: A new dimension of sustainability science, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 15969–, 2007.
- Brown, J. H., Burnside, W. R., Davidson, A. D., DeLong, J. P., Dunn, W. C., Hamilton, M. J., Mercado-Silva, N., Nekola, J. C., Okie, J. G., Woodruff, W. H., Zuo, W., Energetic Limits to Economic Growth, *BioScience*, **61**, 19–26, 2011.
- Butzer, K. W., Endfield, G. H., Critical perspectives on historical collapse, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**, 3628–3631, 2012.
- Chen, G., Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Separation and Purification Technology*, **38**, 11–41, 2004.
- Clark, W. C., Sustainability Science: A room of its own, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 1737–1738, 2007.
- Daily, G. C., Matson, P. A., Ecosystem services: From theory to implementation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**, 9455–9456, 2008.
- Dangerman, A. T. C. J. y Schellnhuber, H. J., Energy systems transformation, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**, E549–E558, 2013.
- Dube, L., Pingali, P., Webb, P., Paths of convergence for agriculture, health, and wealth, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**, 12294–12301, 2012.
- Ferrer-Balas, D., Lozano, R., Huisingh, D., Buckland, H., Ysern, P.,

² Para la idea general del concepto de *antropoceno*, véase Steffen, *et al.*, 2011.

- Zilahy, G., Going beyond the rhetoric: system-wide changes in universities for sustainable societies, *Journal of Cleaner Production*, **18**, 607–610, 2010.
- Hachmann, J., Olivares-Amaya, R., Atahan-Evrenk, S., Amador-Bedolla, C., Sánchez-Carrera, R. S., Gold-Parker, A., Vogt, L., Brockway, A. M., Aspuru-Guzik, A., The Harvard Clean Energy Project: Large-Scale Computational Screening and Design of Organic Photovoltaics on the World Community Grid, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, **2**, 2241–2251, 2011.
- Hepbasli, A., A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, 593–661, 2008.
- Jerneck, A., Olsson, L., Ness, B., Anderberg, S., Baier, M., Clark, E., Hickler, T., Hornborg, A., Kronsell, A., Lövbrand, E., Persson, J., Structuring sustainability science, *Sustainability Science*, **6**, 69–82, 2010.
- Kates, R. W., Clark, W. C., Corell, R., Hall, J. M., Jaeger, C. C., Lowe, I., McCarthy, J. J., Schellnhuber, H. J., Bolin, B., Dickson, N. M., Faucheux, S., Gallopin, G. C., Grübler, A., Huntley, B., Jäger, J., Jodha, N. S., Kaspersen, R. E., Mabogunje, A., Matson, P., Mooney, H., Moore, B., O’Riordan, T., Svedin, U., *Sustainability Science*, *Science*, **292**, 641–642, 2001.
- Kates, R. W., Dasgupta, P., African poverty: A grand challenge for sustainability science, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 16747–16750, 2007.
- Kates, R. W., *Readings in Sustainability Science and Technology*. CID Working Paper No. 213. Center for International Development, Harvard University. Cambridge, MA: Harvard University, December 2010.
- Kates, R. W., What kind of science is sustainability science?, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**, 19449–19450, 2011.
- Kleiner, K., Peak energy: promise or peril?, *Nature Reports Climate Change*, **3**, 31–33, 2009.
- Kool, R., Limits to Growth, environmental science and the nature of modern prophecy, *Ecological Economics*, **85**, 1–5, 2013.
- Le Pen, Y., Sévi, B., What trends in energy efficiencies? Evidence from a robust test, *Energy Economics*, **32**, 702–708, 2010.
- Lewis, N. S., Nocera, D. G., Powering the planet: chemical challenges in solar energy utilization, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **103**, 15729–15735, 2006.
- MacDonald, G. M., Climate Change and Water in Southwestern North America Special Feature: Water, climate change, and sustainability in the southwest, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **107**, 21256–21262, 2010.
- MacKay, D. J. C., *Sustainable Energy – Without the Hot Air*. UIT Cambridge Ltd., 2009. ISBN: 1906860017
- National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling, *The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling, Report to the President*, January 2011.
- Ostrom, E., A diagnostic approach for going beyond panaceas, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 15181–15187, 2007.
- Pires, J. C. M., Martins, F. G., Alvim-Ferraz, M. C. M., Simões, M., Recent developments on carbon capture and storage: An overview, *Chemical Engineering Research and Design*, **89**, 1446–1460, 2011.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., A safe operating space for humanity, *Nature*, **461**, 472–475, 2009a.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J., Planetary Boundaries: Exploring the safe operating space for humanity, *Ecology and Society*, **14**, 32, 2009b. (online) URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>
- Schellnhuber, H. J., Tipping elements in the Earth System, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**, 20561–20563, 2009.
- Schlosser, P., Pfirman, S., Earth Science for Sustainability, *Nature Geoscience*, **5**, 587–588, 2012.
- Segalàs, J., Ferrer-Balas, D., Svanström, M., Lundqvist, U., Mulder, K. F., What has to be learnt for sustainability? A comparison of bachelor engineering education competences at three European universities, *Sustainability Science*, **4**, 17–27, 2009.
- Skidelsky, R., Skidelsky, E., *How much is enough? Money and the good life*, Other Press, 2012. ISBN: 1590515072.
- Smil, V., *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*. MIT Press, 2008.
- Solomon, S. et al. (eds.), *Climate Change 2007: The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- Steenveeldt, R., Berger, B., Torp, T. A., CO₂ Capture and Storage, *Chemical Engineering Research and Design*, **84**, 739–763, 2006.
- Steffen, W., Persson, A., Deutsch, L., Zalasiewicz, J., Williams, M., Richardson, K., Crumley, C., Crutzen, P., Folke, C., Gordon, L., Molina, M., Ramanathan, V., Rockström, J., Scheffer, M., Schellnhuber, H. J., Svedin, U., The Anthropocene: From Global Change to Planetary Stewardship, *AMBIO*, **40**, 739–761, 2011.
- The Blue Planet Prize laureates, Environment and Development Challenges: The Imperative to Act, The Asahi Glass Foundation, 2012. (http://www.af-info.or.jp/en/bpplaureates/doc/2012jp_fp_en.pdf, confirmado el 13-02-2013)
- Thomson-Reuters, *Top 100 Chemists, 2000–2010*. Special Report On High-Impact Chemists. 2011. ([http://archive.sciencewatch.com/dr/sci/misc/Top100Chemists 2000-10](http://archive.sciencewatch.com/dr/sci/misc/Top100Chemists%2000-10), confirmado el 13-02-2013)
- Turner II, B. L., Lambin, E. F., Reenberg, A., The emergence of land change science for global environmental change and sustainability, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**, 20666–20671, 2007.
- Van den Bergh, J. C. J. M., Policies to enhance economic feasibility of a sustainable energy transition, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**, 2436–2437, 2013.
- Whitesides, G. M., Crabtree, G. W., Don’t Forget Long-Term Fundamental Research in Energy, *Science*, **315**, 796–798, 2007.
- Whitesides, G. M., Deutch, J., Let’s get practical, *Nature*, **469**, 21–22, 2011.
- Wijkman, A., Rockström, J., *Bankrupting Nature: Denying Our Planetary Boundaries*. Routledge, 2012. ISBN: 0415539692