

## La definición geológica del Antropoceno según el Anthropocene Working Group (AWG)

### *Geological definition of the Anthropocene by the Anthropocene Working Group (AWG)*

**ALEJANDRO CEARRETA**

Dpto. de Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Apartado 644, 48080 Bilbao. E-mail: alejandro.cearreta@ehu.es

**Resumen** Los seres humanos hemos venido desarrollando una influencia creciente sobre la Tierra desde hace miles de años, aunque de carácter regional y altamente diacrónico. Con el inicio de la Revolución Industrial la humanidad representó una fuerza geológica más pronunciada, aunque no fue hasta la mitad del siglo XX cuando el impacto planetario de la Gran Aceleración se convirtió en un fenómeno global y sincrónico. El AWG propone un límite localizado en el año 1945 como punto de inflexión histórico determinado por la explosión de la bomba nuclear Trinity en Alamogordo (USA) o, alternativamente, en 1952 sobre la base de la señal quimioestratigráfica que representa el inicio del registro sedimentario de radioisótopos de origen artificial. Un posible GSSP debería estar localizado entre los 30-60 grados al norte del Ecuador, donde la señal radioactiva es máxima, y posiblemente en medios sedimentarios marinos someros o lacustres.

**Palabras clave** AWG, Antropoceno, límite Holoceno/Antropoceno, pruebas atómicas, plásticos

**Abstract** *Humans have been exerting an increasing, although regional and highly diachronous, influence on the Earth for thousands of years. With the onset of the Industrial Revolution humanity turned into a more pronounced geological force, although it was not until the mid-20th century when the planetary impact of the Great Acceleration became a global and synchronous phenomenon. The AWG proposes a boundary located at 1945 as an historical turning point determined by the explosion of the Trinity nuclear bomb at Alamogordo (USA) or alternatively at 1952 based on the chemostratigraphical signal represented by the start of the radionuclides fallout record. A possible GSSP should be placed between 30-60 degrees north of the Equator, where radioactive fallout is maximum, and possibly in shallow marine or lake environments.*

**Keywords** AWG, Anthropocene, Holocene/Antropoceno boundary, nuclear tests, plastics

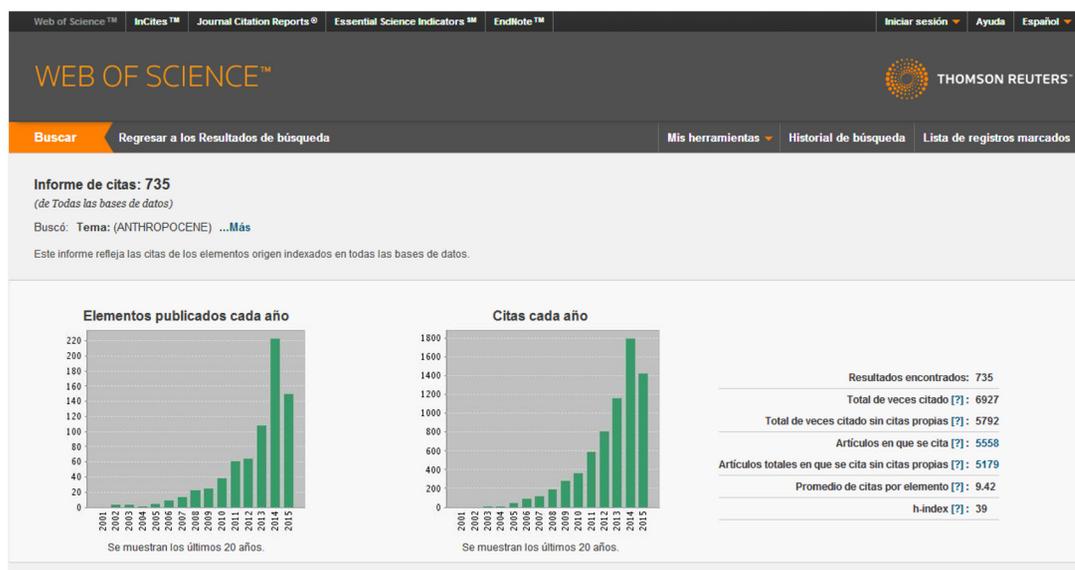
## INTRODUCCIÓN

El término Antropoceno fue acuñado inicialmente por Crutzen y Stoermer (2000) en el contexto del Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP) con el fin de reflejar la intensidad de la modificación humana sobre la superficie terrestre. A pesar de que la idea no fuera completamente original y tuviera sus antecedentes (por ejemplo: Marsh, 1864; Stoppani, 1873), este concepto rápidamente comenzó a utilizarse de modo generalizado, no sólo en el ámbito de las Ciencias Naturales y de la Tierra, de las cuales emergió inicialmente, sino también entre las Humanidades, las Ciencias Sociales y Económicas, y las Artes. Este interés transversal por el Antropoceno puede verse reflejado, por ejemplo, en el crecimiento exponencial que muestra el número de

publicaciones y citas que han utilizado este término en los últimos 15 años según el buscador Web of Science (Fig. 1). Asimismo, la aparición reciente de 3 nuevas revistas científicas multidisciplinares dedicadas en exclusiva a este argumento: Anthropocene (Elsevier) desde 2013, Elementa: Science of the Anthropocene (on-line y open access) desde 2013, y The Anthropocene Review (Sage) desde 2014, es un signo de la creciente importancia académica que está adquiriendo este concepto.

Actualmente el Antropoceno está siendo evaluado como una posible nueva unidad dentro de la Tabla Cronoestratigráfica Internacional por el Anthropocene Working Group (AWG, Grupo de Trabajo sobre el Antropoceno, [quaternary.stratigraphy.org/workinggroups/anthropocene/](http://quaternary.stratigraphy.org/workinggroups/anthropocene/)) que forma parte de la Subcomisión sobre Estratigrafía del Cuaternario

Fig. 1. Crecimiento exponencial en el número de publicaciones y citas que han utilizado el término "Anthropocene" durante los últimos 20 años según el buscador Web of Science (consultado 20 agosto 2015).



que, a su vez, es uno de los organismos que constituyen la Comisión Internacional de Estratigrafía. Desde el año 2009 el AWG, que está constituido por 38 geocientíficos/as, se encuentra examinando las distintas evidencias disponibles para determinar la validez, el nivel jerárquico y la duración de esta posible unidad en la escala del tiempo geológico (Zalasiewicz et al., 2012b). Este análisis incluye el examen de las evidencias de cambio global contemporáneo y su traducción en el registro geológico. Sin embargo, el problema de su definición y formalización es más complejo del que han presentado hasta ahora otros intervalos de tiempo geológico ya establecidos debido al mayor nivel de estudio interdisciplinar necesario, la naturaleza variable de las evidencias, y al hecho de que el Antropoceno se encuentre en sus primeros estadios de desarrollo. Un informe sobre las evidencias disponibles y las recomendaciones elaboradas por el AWG será presentado durante el International Geological Congress que se celebrará en Ciudad del Cabo (Sudáfrica) el año 2016.

Distintos trabajos publicados por miembros del AWG han analizado en profundidad si el concepto es geológicamente justificable, si su formalización es de utilidad para la comunidad científica, y cómo puede ser caracterizado y definido. Recientemente, Zalasiewicz et al. (2015c) han evaluado la cuestión de su límite inicial. Este límite es independiente de la posible formalización definitiva o no del Antropoceno, del mismo modo que existen otros términos estratigráficos no oficiales pero que son comúnmente utilizados en Geología (como, por ejemplo, Precámbrico o Terciario) para los cuales existe sin embargo una duración bien establecida. Aún no ha sido tratada en detalle la cuestión de su posible nivel jerárquico, aunque la opinión mayoritaria dentro del AWG apunta a un nivel de Época (al igual que el Holoceno).

La Tabla Cronostratigráfica Internacional establece las divisiones básicas del tiempo geológico mediante las cuales pueden ser clasificados y analizados los 4.600 millones de años de historia de nuestro planeta y todas las rocas que se han formado dentro de ese lapso temporal. Para definir cualquier unidad dentro de esta tabla, quizás el aspecto

más importante es el establecimiento de su límite, bien sea su límite inferior dentro de los estratos o su inicio temporal, ya que aporta un nivel sincrónico y correlacionable a nivel global. La historia de la Tierra, tal y como está formalizada, presenta una doble jerarquía de unidades temporales. Por una parte, existe la escala geocronológica que es simplemente temporal y permite, por ejemplo, hablar del Periodo Cuaternario. Por otra parte, tenemos la escala cronostratigráfica cuya unidad equivalente sería el Sistema Cuaternario, que incluye a todos los materiales depositados durante el Periodo Cuaternario. Por tanto, considerando el Antropoceno, se podría hablar de su historia dentro de la Época Antropoceno y asimismo de su registro geológico material representado por la Serie Antropoceno.

El Antropoceno requiere, por tanto, una consideración sea como una unidad geocronológica en sentido estricto, o como un registro estratigráfico físico con componentes litoestratigráficos, bioestratigráficos, quimioestratigráficos, etc. Esta Serie Antropoceno incluiría a todos los depósitos acumulados por encima de su límite establecido, sean éstos tanto de origen antropogénico como de origen natural, incluidos aquellos que no presenten influencia humana alguna (como, por ejemplo, las tobas volcánicas o las arenas del desierto). La cuestión en este caso no es buscar un marcador estratigráfico de ese límite que refleje el tiempo desde el que comenzó el cambio antropogénico, es decir, la presencia o ausencia de huellas humanas en los estratos. Se trata, en cambio, de ver si el registro estratigráfico de nuestro planeta (y los procesos que lo modelan) han cambiado de modo suficiente para hacer justificable y de utilidad una nueva unidad temporal. Si así fuese, deberíamos buscar para la misma el horizonte límite más detectable posible a escala global (Zalasiewicz et al., 2012a).

A pesar de su breve duración, la aceleración e intensificación antropogénica de los procesos de erosión y sedimentación en la superficie terrestre han provocado que el registro físico del Antropoceno sea ya cuantitativamente importante y que una gran parte de ese registro sea claramente diferenciable del registro holoceno debido a la novedad geológica de

muchos materiales y procesos provocados por los humanos. La nueva época geológica propuesta debería constituir una unidad estratigráfica diferenciable que esté caracterizada por una serie de huellas antropogénicas precisas, ubicuas y permanentes en las rocas, el hielo glaciario o los sedimentos marinos (Zalasiewicz et al., 2015a).

## OPCIONES PARA DEFINIR EL ANTROPOCENO

Desde la definición inicial del concepto en el año 2000, se han propuesto por parte de distintos autores diversas opciones para el establecimiento del inicio del Antropoceno, de las cuales hay 3 alternativas básicas y que están ligadas a cambios significativos en la Historia de la Tierra.

### El denominado Antropoceno temprano

Por una parte, existen evidencias crecientes de un impacto humano temprano sobre la superficie terrestre en forma de modificación de hábitats o cambios en la biota. Según Ruddiman (2003, 2013), el inicio de la agricultura modificó los niveles de dióxido de carbono (desde 260 a 280 ppm a lo largo de varios miles de años) y ha mantenido estable la temperatura durante el Holoceno, evitando o retrasando la transición a la siguiente fase glaciaria. Esta idea del Antropoceno temprano pone especial atención en las señales asociadas con el inicio de la deforestación, la agricultura y la domesticación animal. Además, las comunidades humanas dejaron localmente un abundante registro arqueológico (Edgeworth et al., 2015) que hace a este interglaciario diferente de todas las fases cálidas previas. Según esta idea, apoyada fundamentalmente por la comunidad arqueológica, el Antropoceno pudo comenzar hace relativamente bastante tiempo.

En la práctica, el límite del Antropoceno temprano basado en señales estratigráficas de origen humano es difícil de seguir y correlacionar, ya que los indicadores de cambio antropogénico (artefactos, biotas vegetales y animales modificadas antropogénicamente) reflejan una expansión e intensidad variables de la huella humana. Los criterios para definir este intervalo son típicamente reconocibles a nivel local y regional, pero globalmente son diacrónicos a escalas de tiempo que oscilan entre los milenios y decenas de milenios. Además, esta hipótesis presenta un amplio solapamiento con el Holoceno que haría del Antropoceno un concepto superfluo como unidad diferenciada del tiempo geológico.

### La Revolución industrial

En segundo lugar, la propuesta original sobre el Antropoceno relacionaba claramente su inicio con la Revolución Industrial, a comienzos del siglo XIX, tras la invención de la máquina de vapor por James Watt y coincidiendo con el incremento inicial en las concentraciones de dióxido de carbono y metano atmosféricos por encima de la línea base del Holoceno (Crutzen, 2002). Este momento representa el salto desde un largo periodo de crecimiento lento e irregular de la población humana que expandió geográficamente la modificación agrícola de la superficie terrestre y el uso de energía mediante una combi-

nación de madera y fuerza muscular, a un intervalo de rápido incremento de la población ligado al desarrollo urbano y a la industrialización alimentada por una utilización creciente de combustibles fósiles.

La importancia del Antropoceno reside en que no debe ser indicativo de las primeras evidencias de transformación ambiental por parte de nuestra especie (es decir, no debe representar una perspectiva antropocéntrica de la Geología), sino que debe basarse en la magnitud, la intensidad y la duración de esa transformación del planeta. Actualmente ocurre que esa transformación es de origen humano, del mismo modo que otros organismos modificaron las condiciones ambientales del planeta en el pasado geológico, por ejemplo, las cianobacterias durante el evento denominado la Gran Oxidación hace 2.400 millones de años. Un límite asociado con el inicio de la Revolución Industrial sería más claramente representativo de un gran cambio planetario. Sin embargo, en términos de correlación, este límite también replica en menor medida los problemas asociados con el límite del Antropoceno temprano. Así, la Revolución Industrial se expandió desde Inglaterra hasta Europa continental y Norteamérica durante un intervalo temporal de un siglo (Waters et al., 2014b) y, en algunos aspectos, la industrialización actual de China o India representa su continuación. Las señales estratigráficas directas asociadas con la industrialización y su urbanización paralela son, por tanto, diacrónicas y están afectadas por discontinuidades a pequeña escala. Además, ciertas señales globales como el ascenso en los niveles de dióxido de carbono son graduales a lo largo de décadas y, por tanto, de escasa utilidad para establecer un límite preciso.

### La Gran Aceleración

Por último, la historia ambiental más reciente ha mostrado, a partir de la Segunda Guerra Mundial, una fase de incremento acelerado de la población humana paralela a un enorme crecimiento económico global, que han provocado un cambio ambiental de escala e intensidad sin precedentes en nuestro planeta. Esta fase ha sido denominada la Gran Aceleración (Steffen et al., 2007, 2015). Desde 1945 la proporción de personas viviendo en ciudades se ha disparado desde un 27% hasta el 53% actual (en números absolutos, de 730 millones a 3.700 millones). Esta Gran Aceleración ha sido identificada como un enorme cambio cualitativo en la actividad humana sobre la Tierra y aparece reflejada también en distintos marcadores estratigráficos descritos en Waters et al. (2014a). Estos marcadores incluyen, entre otros, la difusión global de radionucleidos artificiales a partir de las explosiones atómicas en la atmósfera, la duplicación del almacén de nitrógeno reactivo como resultado de la producción de fertilizantes mediante el proceso Haber-Bosch, la creación y dispersión global en el medio de nuevos materiales de origen humano (plásticos, desechos de aluminio, cemento) y de artefactos fabricados con esos materiales que pueden ser considerados como los tecnofósiles del futuro (Zalasiewicz et al., 2014), la dispersión global de contaminantes debida a la expansión de las actividades industriales que incluyen nuevos compuestos orgánicos y grandes

concentraciones de metales pesados, las extinciones e invasiones de especies terrestres y marinas que modifican la composición de las comunidades bióticas y que dejarán un claro registro paleontológico, la aceleración en la combustión de hidrocarburos que ha provocado desde mediados del siglo XX el incremento de 120 ppm en los niveles de dióxido de carbono atmosférico y la distribución global casi sincrónica de partículas esféricas carbonáceas (Rose, 2015), el transporte anual de materiales por actividades humanas que ha triplicado globalmente el transporte sedimentario de los ríos a los océanos, etc.

Algunas de estas señales (como los radionucleidos) son de efectos sincrónicos globales mientras que otras presentan una baja diacronicidad ya que esta segunda mitad del siglo XX se ha caracterizado por la denominada globalización y el asentamiento de una intensa tecnosfera globalmente interconectada (Haff, 2014). Por esta razón, muchas de las señales relacionadas con la industria (por ejemplo, posibles tecnofósiles como los ladrillos, los bolígrafos, los CD o los teléfonos móviles) se difunden rápidamente por el planeta a partir de su creación (Fig. 2). Existen múltiples criterios estratigráficos que pueden ser utilizados para identificar depósitos posteriores a la mitad del siglo XX y el AWG considera mayoritariamente esta fecha, basándose en las evidencias actuales, como la posición óptima para el límite inferior del Antropoceno (Zalasiewicz et al., 2015c).

Por otra parte, Wolff (2014) ha sugerido que los mayores cambios debidos a la perturbación humana están aún por venir en el futuro y que, por tanto, sería necesaria una perspectiva a más largo plazo para poder valorar adecuadamente el Antropoceno. El AWG está de acuerdo en que los mayores cambios están todavía por llegar y que el carácter estratigráfico del Antropoceno probablemente se presentará de modo diferente desde una perspectiva futura, conforme otras señales estratigráficas se vayan produciendo, por ejemplo, mediante una transgresión marina o una extinción masiva. Sin embargo, la escala de estos cambios actualmente indica ya perturbaciones de tal magnitud que son comparables con otros cambios detectados en el registro geológico a

escala de época. El Antropoceno tiene ya una base geológica robusta y refleja la realidad geológica actual, presenta utilidad práctica, se utiliza de modo generalizado y, de hecho, se está convirtiendo en un concepto central e integrador en la consideración del cambio global. Por tanto, el AWG considera que una definición inicial de su duración como unidad, independientemente de su estatus formal, puede ser de gran interés científico.

Recientemente, Lewis y Maslin (2015) han propuesto dos nuevos horizontes potenciales para el límite Holoceno/Antropoceno. Por una parte, el año 1610 que corresponde a un descenso de corta duración en la concentración de dióxido de carbono atmosférico observable en 2 sondeos de hielo en Antártida y que estaría asociado con el despoblamiento de América causado por la colonización europea. Por otra parte, el año 1964 en correspondencia con un pico en la señal de radiocarbono en exceso proveniente de las pruebas atómicas atmosféricas. Sin embargo, para la primera fecha, que ha sido denominada como “hipótesis Orbis”, la magnitud de la fluctuación (~10 ppm) se encuentra dentro del rango de variabilidad natural del dióxido de carbono durante el Holoceno y además no está demostrado su posible origen antropogénico. En cuanto a la segunda fecha, situar el límite en el pico de una señal geoquímica en vez de localizarlo en su comienzo no sigue la práctica estratigráfica normal y además es posterior al incremento exponencial casi sincrónico de muchos parámetros físicos y socio-económicos y de sus respectivas señales estratigráficas (la Gran Aceleración) que pueden ser fechadas alrededor de 1950 (Zalasiewicz et al., 2015a).

Lewis y Maslin (2015) destacan además que la fecha que finalmente se elija para el inicio del Antropoceno afectará a la percepción del relato sobre el impacto humano en el planeta. Así, mientras el año 1610 se considera reflejo del colonialismo, el genocidio y la expansión del comercio global mediante el intercambio de especies y bienes entre América y Europa, la segunda fecha escogida podría simbolizar el control racional sobre el poder tecnológico y su potencial destructivo al ser inmediatamente posterior a la fecha del tratado internacional que puso fin a las pruebas atómicas atmosféricas. En este sentido, Zalasiewicz et al (2015b) en la respuesta oficial del AWG a esta propuesta consideran que la posición de un límite estratigráfico debe ser siempre establecida de modo pragmático y desapasionado, del mismo modo en que han sido escogidos todos los límites estratigráficos anteriores, con el fin de obtener una diferenciación efectiva entre los que serán (por definición) los estratos antropocenos y preantropocenos, por una parte, y la historia humana por otra.

## LOCALIZACIÓN PRECISA DEL LÍMITE

Todas las unidades del Eón Fanerozoico dentro de la Tabla Cronostratigráfica Internacional han sido ya definidas, o se prevé su definición, mediante un Estratotipo Global de Límite (GSSP-Global Boundary Stratigraphic Sections and Points = ‘golden spikes’ o clavos dorados). El registro fósil, idealmente en

*Fig. 2. Detalle de la playa cementada (beachrock) de Tunelboca (Bizkaia) constituida por escorias de fundición provenientes de la industria local de hierro y que contiene abundantes tecnofósiles. Estos materiales fueron originalmente vertidos en mar abierto y depositados por las corrientes y el oleaje en esta playa. Se disponen discordantes al pie de los estratos eocenos que forman el acantilado situado en la bocana de la Ría de Bilbao (Lugar de Interés Geológico-LIG 96 de la Comunidad Autónoma del País Vasco, [www.ingurumena.ejgv.euskadi.eus/r49-u95/es/contenidos/informacion/lig/es\\_def/adjuntos/096.pdf](http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.eus/r49-u95/es/contenidos/informacion/lig/es_def/adjuntos/096.pdf)).*





al., 2015). El Plutonio-239 es raro en la naturaleza pero se trata de un componente importante en los depósitos atmosféricos derivados de las pruebas atómicas. Su elevada vida media (24.110 años) lo convierte en el radionucleido artificial más persistente y detectable durante unos 100.000 años en el futuro (Hancock et al., 2014), y además presenta una baja solubilidad y una elevada reactividad asociándose rápidamente con partículas orgánicas o arcillosas que le convierten en un marcador estable en las capas de sedimentos y suelo. El plutonio se deposita preferentemente en aguas costeras y lacustres, particularmente en medios pobres en oxígeno y ricos en materia orgánica donde existen pocos organismos excavadores que puedan bioturbar los niveles sedimentarios. La distribución geográfica de estos radionucleidos muestra que su depósito está concentrado en las latitudes medias (30-60°) de cada hemisferio, es mínimo en los polos y el Ecuador, y máximo en el hemisferio norte donde tuvieron lugar la mayor parte de las pruebas atómicas (Livingston y Povinec, 2000).

Un límite localizado en el instante de la explosión de Trinity en el año 1945 marcaría un punto de inflexión histórico de significado global asociado con la Gran Aceleración. Sin embargo, en términos estratigráficos prácticos, el año 1952 incluiría todas las señales estratigráficas iniciales de radionucleidos relacionadas con las bombas atómicas. La diferencia entre ambas fechas es tan sólo de 7 años y representa una delimitación muy precisa para un límite general indicado a mediados del siglo XX. Localizar el límite en un momento exacto de tiempo sería consistente con el Código Estratigráfico Internacional y con la definición del límite Pleistoceno/Holoceno. La elección final entre ambas fechas dependerá del análisis y debate del conjunto de evidencias estratigráficas que actualmente está reuniendo el AWG.

## LOS PLÁSTICOS COMO INDICADORES ESTRATIGRÁFICOS

Dentro de los marcadores estratigráficos casi-sincrónicos que pueden ser utilizados para identificar estratos antropocenos se encuentran los plásticos, que son materiales que han sido fabricados abundantemente desde mediados del siglo XX y que se han convertido en un elemento importante e imprescindible de nuestras vidas y de la basura que producimos. Desde un punto de vista geológico, los plásticos son fácilmente reconocibles sin un equipamiento analítico sofisticado como el que es necesario para la detección de los radionucleidos y, por tanto, potencialmente pueden ser un marcador estratigráfico efectivo y ampliamente utilizable para identificar el Antropoceno. Zalasiewicz et al. (en prensa) han analizado en detalle la distribución y el comportamiento del plástico en diferentes medios sedimentarios como posible material geológico.

La mayor parte de los plásticos que han sido producidos en el planeta hasta la fecha aún están presentes en el medio ambiente. Su extraordinaria expansión global puede sintetizarse en el dramático incremento de su producción, desde menos de 2 mil-

liones de toneladas fabricadas en el año 1950 hasta los 300 millones de toneladas/año producidas en la actualidad. Esta cantidad representa aproximadamente unos 40 kg/año de plásticos por cada uno de los 7.000 millones de humanos que habitamos el planeta actualmente; es decir, es prácticamente equivalente al total de la biomasa humana actual (Zettler et al., 2013). Se trata por tanto de una actividad industrial enorme que en este momento utiliza para su fabricación el 8% del petróleo extraído en todo el planeta (Thompson et al., 2009).

La longevidad de los polímeros plásticos es poco conocida ya que se trata de materiales nuevos cuya presencia en el ambiente es sólo de unas pocas décadas. Los plásticos tienen una larga durabilidad a escala humana, particularmente si son enterrados y se encuentran fuera de la radiación ultravioleta que puede provocar su fotodegradación. En general, los plásticos son asimismo resistentes al ataque microbiano lo cual garantiza su utilidad práctica y su longevidad en el medio ambiente. Aún en el caso de su posible digestión microbiana, al igual que ocurre con las conchas de los moluscos, los objetos de plástico podrían fosilizar en forma de moldes y huellas, cuando todo el material original se perdiera a través de la biodegradación. De este modo, los bolígrafos, las botellas de plástico o los CD podrían aparecer como fósiles en las rocas sedimentarias del futuro incluso si el plástico hubiera sido reemplazado por otros materiales.

El potencial de preservación de los materiales plásticos, como el de cualquier otro compuesto orgánico, se incrementa sustancialmente en condiciones deposicionales pobres en oxígeno. Admitiendo que las “zonas muertas” de los fondos costeros y marinos serán más frecuentes y extensas durante el Antropoceno debido a la escorrentía terrestre cargada de nutrientes antropogénicos, así como a la mayor estratificación de las aguas superficiales debido al calentamiento oceánico (Keeling et al., 2010), los materiales plásticos depositados bajo esas condiciones podrían preservarse durante lapsos temporales geológicamente relevantes.

Las bajas temperaturas del océano profundo, asociadas a la ausencia de luz ultravioleta, aumentan la posibilidad de preservación de los plásticos presentes en el lecho marino, que podrían durar siglos o milenios según distintos experimentos de laboratorio (Gregory y Andradý, 2003). A mayores escalas temporales, una vez enterrados en los estratos, su diagénesis y potencial fosilización es un tema de gran interés que aún no ha sido investigado. Su equivalente más próximo podrían ser los polímeros de cadena larga de los fósiles orgánicos como la madera, el polen o los graptolitos que, con frecuencia, fosilizan mediante la pérdida de parte de su material, expulsado en forma de hidrocarburo líquido o gaseoso, dejando una señal carbonizada y un molde externo. En una consideración preliminar, parece probable que muchos plásticos puedan comportarse a escala geológica de modo similar y los hidrocarburos liberados durante la diagénesis pudieran contribuir a los depósitos futuros de petróleo y gas.

Los residuos plásticos de diferentes tamaños están ampliamente distribuidos en medios terrestres y marinos, tanto como macroplásticos visibles a simple

vista como en forma de microplásticos, que son 8 órdenes de magnitud más abundantes y que se encuentran en la mayor parte de los fondos marinos del planeta (Corcoran, 2015). Por tanto, los plásticos son un medio muy efectivo para reconocer sedimentos terrestres y marinos depositados desde la mitad del siglo XX. Por ejemplo, en medios deposicionales donde domina la acumulación sedimentaria, como los deltas y los estuarios, los plásticos presentan un gran potencial de preservación y pueden mostrar un claro patrón estratigráfico en su abundancia relativa con un incremento hacia el techo, reflejando así un aumento histórico en su producción y vertido. Además, en medios productores de carbonato, los plásticos pueden observarse en rocas de playas cementadas (Astibia, 2012; Fig. 4). Por otra parte, a lo largo del talud continental, los plásticos, especialmente los microplásticos, son transportados con frecuencia junto con el sedimento a través de los cañones submarinos (Pham et al., 2014) terminando integrados en los abanicos turbidíticos que se extienden a partir de ellos. Estas capas turbidíticas muestran una selección por tamaño, forma y densidad de los fragmentos plásticos, comparable a la que se observa para otras partículas sedimentarias en turbiditas antiguas (por ejemplo, los fragmentos robustos acaban típicamente en el fondo, en las divisiones A-B de Bouma, mientras que las partículas más ligeras aparecen característicamente concentradas más arriba, en la división C de Bouma laminada por ripples). Los fragmentos plásticos se comportarán de modo similar y aparecerán concentrados en las divisiones C-E de la secuencia. A lo largo del Antropoceno estas secuencias turbidíticas tienen aún una potencia pequeña (centímetros o decímetros) pero se presentan en una extensión muy amplia. Es probable que los plásticos muestren un gran potencial de preservación en estos ambientes.

Se ha investigado poco la huella de los plásticos en las décadas de 1940 y 1950 durante los primeros años de su utilización y antes del reconocimiento de su impacto ambiental en las décadas posteriores. Ese comienzo gradual hace que sea poco práctico localizar el inicio del Antropoceno utilizando los materiales plásticos, aunque estos sean claramente un identificador preciso de los estratos antropocénicos.

Examinando la cuestión con más detalle, hay muchos tipos de plásticos que han sido creados en diferentes momentos históricos y que pueden ser utilizados como “especies” indicadoras a lo largo del tiempo. Por ejemplo, las fibras acrílicas fueron inventadas inicialmente por DuPont en 1941, pero no se produjeron en grandes cantidades hasta la década de 1950.

Prácticamente todos los plásticos han sido moldeados para fabricar artefactos de muy diferentes tipos, cada uno de los cuales en este contexto puede ser considerado como un potencial tecnofósil (Zalasiewicz et al., 2014), es decir, un fósil traza producido por los humanos. Los tecnofósiles muestran una evolución extremadamente rápida y completamente separada de la evolución de su organismo productor (los seres humanos). Por tanto, la aparición de los diferentes artefactos puede marcar una cronología muy detallada. No obstante, es importante distinguir entre la fecha de producción del tecnofósil plástico y el momento de su acumulación, que pueden



presentar una diferencia de meses o años, pero que en cualquier caso supondría una gran resolución temporal raramente disponible en Geología.

## CONCLUSIONES

La característica del Antropoceno reside no tanto en que represente las primeras evidencias geológicas de actividad de nuestra especie, sino en la magnitud, la intensidad y la duración del cambio provocado por nuestra especie sobre el planeta. Los humanos comenzamos a desarrollar una creciente, pero regional y altamente diacrónica, influencia hace miles de años. Con el inicio de la Revolución Industrial la humanidad se convirtió en un factor geológico más pronunciado, pero fue a partir de mediados del siglo XX cuando el impacto planetario de la Gran Aceleración se convirtió en un fenómeno global y prácticamente sincrónico. Debido a que contamos con un registro instrumental histórico datado con gran precisión y un abundante registro estratigráfico correspondiente a este intervalo de tiempo, el AWG sugiere que un límite para el Antropoceno basado en un GSSA es probablemente más sencillo y directo que uno basado en un GSSP. En consecuencia, propone el límite inicial del Antropoceno o bien en el año 1945, basado en el punto de inflexión histórico determinado por la explosión nuclear de la bomba Trinity o, alternativamente, en el año 1952 a partir de la señal quimioestratigráfica que representa el inicio del depósito de los isótopos radioactivos sobre la superficie terrestre como resultado de las pruebas atómicas atmosféricas realizadas entre los años 1945 y 1980. Un posible lugar GSSP para definir el Antropoceno estaría idealmente localizado entre los 30 y 60° de latitud al norte del Ecuador, donde la sedimentación radioactiva es máxima, en ambientes marinos someros o lacustres poco disturbados.

## AGRADECIMIENTOS

Este texto es una síntesis de distintos trabajos publicados colectivamente por los miembros del AWG del cual el autor forma parte. Una primera

Fig. 4. Fragmento de plástico en la playa cementada (beachrock) de Gorrondatxe-Azkorri (Bizkaia) (Foto: H. Astibia; tomada de Zalasiewicz et al., en prensa) (Lugar de Interés Geológico-LIG 96 de la Comunidad Autónoma del País Vasco, www.ingurumena.ejgv.euskadi.eus/r49-u95/es/contenidos/informacion/lig/es\_def/adjuntos/096.pdf).

versión del mismo fue presentada como comunicación oral en la XIV Reunión Nacional de Cuaternario (Granada, julio 2015) dentro del simposio dedicado al Registro sedimentario del Antropoceno. Representa una contribución a los proyectos Harea-Grupo de Investigación en Geología Litoral (GV, IT767-13), Unidad de Formación e Investigación en Cuaternario (UPV/EHU, UFI11/09), y Antropocosta-El registro sedimentario antropoceno en los medios litorales cantábricos (MINECO, CGL2013-41083-P). Contribución nº 35 de la Unidad de Investigación Geo-Q Zentroa (Laboratorio Joaquín Gómez de Llarena).

## BIBLIOGRAFÍA

- Astibia, H. (2012). Tunelboka y Gorrondatxe (Getxo, Bizkaia), fósiles humanos para el Antropoceno. *Euskonews*, 640, 1-11.
- Corcoran, P.L. (2015). Benthic plastic debris in marine and fresh water environments. *Environmental Sciences: Processes & Impacts*, <http://dx.doi.org/10.1039/C5EM00188A>.
- Crutzen, P.J. (2002). Geology of Mankind. *Nature*, 415, 23.
- Crutzen, P.J. y Stoermer, E.F. (2000). The "Anthropocene". *Global Change Newsletter*, 41, 17-18.
- Edgeworth, M., Richter, D.D., Waters, C., Haff, P., Neal, C. y Price, S.J. (2015). Diachronous beginnings of the Anthropocene: The lower bounding surface of anthropogenic deposits. *The Anthropocene Review*, 2, 1-26.
- Gregory, M.R. y Andrady, A.L. (2003). *Plastics in the marine environment*. En: *Plastics and the Environment* (Ed.: A.L. Andrady). Wiley & Sons, 379-401.
- Haff, P.K. (2014). *Technology as a geological phenomenon: implications for human well-being*. En: *A Stratigraphical Basis for the Anthropocene* (Eds.: C.N. Waters, J. Zalasiewicz, M. Williams, M.A. Ellis y A. Snelling). Geological Society of London, Special Publication 395, 301-309.
- Hancock, G.J., Tims, S.G., Fifield, L.K. y Webster, I.T. (2014). *The release and persistence of radioactive anthropogenic nuclides*. En: *A Stratigraphical Basis for the Anthropocene* (Eds.: C.N. Waters, J. Zalasiewicz, M. Williams, M.A. Ellis y A. Snelling). Geological Society of London, Special Publication 395, 265-281.
- Irabien, M.J., García-Artola, A., Cearreta, A. y Leorri E. (2015). Chemostratigraphic and lithostratigraphic signatures of the Anthropocene in estuarine areas from the eastern Cantabrian coast (N. Spain). *Quaternary International*, 364, 196-205.
- Keeling, R.F., Kortzinger, A. y Gruber, N. (2010). Ocean deoxygenation in a warming world. *Annual Review of Marine Science*, 2, 199-229.
- Lewis, S.L. y Maslin, M.A. (2015). Defining the Anthropocene. *Nature*, 519, 171-180.
- Livingston, H.D. y Povinec, P.P. (2000) Anthropogenic marine radioactivity. *Ocean & Coastal Management*, 43, 689-712.
- Marsh, G.P. (1864). *Man and Nature or Physical Geography as Modified by Human Action*. University of Washington Press, 512 p.
- Molina, E., Alegret, L., Arenillas, I., Arz, J.A., Gallala, N., Hardenbol, J., von Salis, K., Steuerbaut, E., Vandenberghe, N. y Zagbib-Turki, D. (2006). The Global Boundary Stratotype Section and Point for the base of the Danian Stage (Paleocene, Paleogene, "Tertiary", Cenozoic) at El Kef, Tunisia—original definition and revision. *Episodes*, 29, 263-273.
- Pham, C.K., Ramirez-Llodra, E., Alt, C.H.S., Amaro, T., Bergmann, M., Canals, M., Company, J.B., Davies, J., Duineveld, G., Galgani, F., Howell, K.L., Huvenne, V.A.I., Isidro, E., Jones, D.O.B., Lastras, G., Morato, T., Gomes-Pereira, J.N., Purser, A., Stewart, H., Tojeira, I., Tubau, X., Rooij, D.V. y Tyler P.A. (2014). Marine litter density and distribution in European seas, from shelves to deep basins. *PLoS ONE*, 9, e95839.
- Ritchie, J.C. y McHenry, J.R. (1990). Application of radioactive fallout Cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A review. *Journal of Environmental Quality*, 19, 215-233.
- Rose, N.L. (2015). Spheroidal carbonaceous fly ash particles provide a globally synchronous stratigraphic marker for the Anthropocene. *Environmental Science & Technology*, 49, 4155-4162.
- Ruddiman, W.F. (2003). The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic Change*, 61, 261-293.
- Ruddiman, W.F. (2013). Anthropocene. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41, 45-68.
- Steffen, W., Crutzen, P.J. y McNeill, J.R. (2007). The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of Nature? *Ambio*, 36, 614-621.
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O. y Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: the Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2, 81-98.
- Stoppani, A. (1873). *Corso di Geologia, Volume II Geologia Stratigrafica*. Ed. Bernardoni y Brigola, 868 p.
- Thompson, R.C., Moore, C., vom Saal, F.S. y Swan, S.H. (2009). Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364, 2153-2166.
- UNSCEAR-United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation, 2000 Report*. United Nations, New York, 17 p.
- Walker, M., Johnsen, S., Olander Rasmussen, S., Popp, T., Steffense, J.-P., Gibbard, P., Hoek, W., Lowe, J., Andrews, J., Björck, S., Cwynar, L.C., Hughen, K., Newham, R. y Schwander, J. (2009). Formal definition and dating of the GSSP (Global Stratotype Section and Point) for the base of the Holocene using the Greenland NGRIP ice core, and selected auxiliary records. *Journal of Quaternary Science*, 24, 3-17.
- Waters, C.N., Syvitski, J.P.M., Gatuszka, A., Hancock, G.J., Zalasiewicz, J., Cearreta, A., Grinevald, J., Jeandel, C., McNeill, J.R., Summerhayes, C. y Barnosky, A. (2015). Can nuclear weapons fallout mark the beginning of the Anthropocene Epoch? *Bulletin of Atomic Scientists*, 71, 46-57.
- Waters, C.N., Zalasiewicz, J., Williams, M., Ellis, M.A. y Snelling, A. (Eds) (2014a). *A Stratigraphical Basis for the Anthropocene*. Geological Society of London, Special Publication 395, 321 p.
- Waters, C.N., Zalasiewicz, J., Williams, M., Ellis, M.A. y Snelling, A. (2014b). *A stratigraphical basis for the Anthropocene?* En: *A Stratigraphical Basis for the Anthropocene* (Eds.: C.N. Waters, J. Zalasiewicz, M. Williams, M.A. Ellis y A. Snelling). Geological Society of London, Special Publication 395, 1-21.
- Wolff, E.W. (2014). *Ice sheets and the Anthropocene*. En: *A Stratigraphical Basis for the Anthropocene* (Eds.: C.N. Waters, J. Zalasiewicz, M. Williams, M.A. Ellis y A. Snelling). Geological Society of London, Special Publication 395, 255-263.
- Zalasiewicz, J., Cearreta, A., Ellis, E., Ellis, M., Grinevald, J., McNeill, J., Poirier, C., Price, S., Richter, D., Steffen, W., Vidas, D., Waters, C., Williams, M. y Wolfe, A. (2012a).

Response to Autin and Holbrook on: Is the Anthropocene an issue of stratigraphy or pop culture? *GSA Today*, 22, e21-e22.

Zalasiewicz, J., Crutzen, P.J. y Steffen, W. (2012b). Chapter 32. *Anthropocene*. En: The Geologic Time Scale 2012 (Eds.: F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz y G.M. Ogg). Elsevier, Amsterdam, 1033-1040.

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

Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Barnosky, A.D., Cearreta, A., Edgeworth, M., Ellis, E.C., Galuszka, A., Gibbard, P.L., Grinevald, J., Hajdas, I., Ivar do Sul, J., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Poirier, C., Revkin, A., Richter, D., Steffen, W., Summerhayes, C., Syvitski, J.P.M., Vidas, D., Wagemann, M. y Wolfe, A.P. (2015a). Disputed start dates for Anthropocene. *Nature*, 520, 436.

Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Barnosky, A.D., Cearreta, A., Edgeworth, M., Ellis, E.C., Galuszka, A., Gibbard, P.L., Grinevald, J., Hajdas, I., Ivar do Sul, J., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Poirier, C., Revkin, A., Richter, D., Steffen, W., Summerhayes, C., Syvitski, J.P.M., Vidas, D., Wagemann, M., Williams, M. y Wolfe, A.P. (2015b). Colonization of the Americas, "Little Ice Age" climate, and bomb-produced carbon: Their role in defining the Anthropocene. *The Anthropocene Review*, 2, 117-127.

Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Williams, M., Barnosky, A.D., Cearreta, A., Crutzen, P., Ellis, E., Ellis, M., Fairchild, I.J., Grinevald, J., Haff, P.K., Hajdas, I., Leinfelder, R., McNeill, J., Odada, E.O., Poirier, C., Richter, D., Steffen, W., Summerhayes, C., Syvitski, J.P.M., Vidas, D., Wagemann, M., Wing, S.L., Wolfe, A.P., Zhisheng, A. y Naomi Oreskes, N. (2015c). When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal. *Quaternary International*, 383, 196-203

Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Ivar do Sul, J., Corcoran, P.L., Barnosky, A.D., Cearreta, A., Edgeworth, M., Galuszka, A., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Steffen, W., Summerhayes, C., Wagemann, M., Williams, M., Wolfe, A.P. y Yonan, Y. (en prensa). The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. *Anthropocene*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2016.01.002>

Zettler, E.R., Mincer, T.J. y Amaral-Zettler, L.A. (2013). Life in the "Plastisphere": Microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, 47, 7137-7146. ■

*Este artículo fue recibido el día 20 de agosto y aceptado definitivamente para su publicación el 25 de septiembre de 2015.*