

Algún apunte sobre el posible origen del agua en la Tierra

Rafael Marín Galvín, jefe de Control de Calidad de la Empresa Municipal de Aguas de Córdoba, S.A. (Emacsa)



¿Cómo y de dónde proceden los 1.386 millones de km^3 de agua que hoy alberga nuestro planeta? Las últimas investigaciones fijan el foco sobre la proporción del isótopo deuterio (D) con relación al hidrógeno presente en el agua terrestre, actualmente 1 átomo de D por cada 6.410 de hidrógeno (H) o, dicho de otra forma, en el agua normal solo existen 156 átomos de D por cada 10^6 átomos de H (equivalente a 156 ppm). El valor de este parámetro comparado con el valor de esta relación entre agua de diferentes orígenes (terrestres o extraterrestres) informa sobre las posibles fuentes de agua para la Tierra. Así, una parte importante de nuestra provisión de agua tiene procedencia claramente extraterrestre (asteroides, planetoides y cometas que impactaron en un determinado momento sobre nuestro planeta). Otra porción importante se recibió como consecuencia de un evento catastrófico que supuso la formación de la Luna y un importante proceso o procesos de fusión de partes del planeta hace más de 4.000 millones de años. Además, en la formación de la Tierra desde la primitiva nebulosa germen del sistema solar, esta ya incorporó agua en sus primeros cientos de millones de años. Finalmente, y una vez desarrollada la vida planetaria, la generación de agua vía biológica también ha podido contribuir a la cantidad de agua actualmente existente, parte de la cual regresa al espacio vía descomposición ultravioleta (UV).



CONTENIDO ACTUAL DE AGUA EN LA TIERRA

El agua es el vehículo idóneo donde se desarrollan las complejas reacciones bioquímicas que hacen posible el desarrollo de la actividad vital de cualquier ser vivo, al menos según el actual conocimiento sobre el tema. Además, se trata probablemente del único compuesto que se puede encontrar en nuestro planeta en los tres estados físicos de agregación de la materia (líquida, sólida y gaseosa) y en una cantidad considerable: se cifra el total de agua en la Tierra en 1.386 millones de km^3 , de los cuales un 2,53% (35,03 millones de km^3) del total corresponde a agua dulce.

Como es conocido, existen continuos tránsitos entre el agua ubicada en los diferentes nichos ambientales que ocupa, dando lugar al denominado 'ciclo hidrológico', cuyo catalizador primario radica en la irradiación solar que llega a nuestro planeta continuamente. Tal es así que esta irradiación provoca la evaporación de cantidades ingentes de agua desde la superficie libre de los océanos y mares (especialmente) hasta la atmósfera, desde donde revierte depositándose bajo forma de lluvia.

En el 'ciclo', además, intervienen otros factores como son la evaporación de agua desde el propio terreno, la evapotranspiración de plantas y seres vivos e, incluso, el balance entre detracción y aporte de agua usada por el hombre (**Figura 1**). En esta figura, además, se recogen los flujos más relevantes entre los nichos ambientales donde se acumula agua en nuestro planeta, así como el contenido actualmente estimado en ellos. Como resumen, y según los últimos datos disponibles, podríamos hablar de los siguientes, teniendo en cuenta la cifra de $1 \text{ km}^3 = 10^9 \text{ m}^3 = 10^{12} \text{ L}$:

- Evaporación de aguas desde el océano hacia la atmósfera: 426 $\text{km}^3/\text{año}$.
- Precipitaciones y lluvias en el océano desde la atmósfera: 386 $\text{km}^3/\text{año}$.
- Precipitaciones y lluvias en zonas terrestres: 114 $\text{km}^3/\text{año}$.
- Evaporación y transpiración de seres vivos: 74 $\text{km}^3/\text{año}$.
- Transporte de agua atmosférica desde océanos hacia tierra firme: 40 $\text{km}^3/\text{año}$.
- Flujo superficial de ríos y lagos hacia océanos: 38 $\text{km}^3/\text{año}$.
- Percolación de aguas superficiales: 16,5 $\text{km}^3/\text{año}$.
- Flujo subterráneo de aguas hacia océanos: 2 $\text{km}^3/\text{año}$.

En todo caso, la provisión global de agua en la Tierra es invariante desde hace miles de millones de años, estando sometida al antes referido "ciclo hidrológico". Este consiste en una serie de cambios de fase, de características físicas, químicas y microbiológicas, e incluso de emplazamiento físico (mares, nubes, glaciares, ríos, aguas subterráneas) cuyo último efecto es la 'renovación' periódica de la dotación de agua en las grandes acumulaciones o depósitos de esta existentes en el planeta: océanos, ríos y lagos, atmósfera y litosfera.

Aprovechando la misión astronáutica de la NASA y la llegada a Marte del Perseverance el 18 de febrero pasado, con el objetivo prioritario de buscar agua y vida (remota o actual) en el vecino planetario, se puede indagar sobre la cuestión de la procedencia del agua en nuestro propio planeta.

POSIBLE ORIGEN DEL AGUA EN LA TIERRA

Dado que, como se dijo antes, la cantidad de agua en nuestro planeta apenas ha variado geológicamente hablando desde hace miles de millones de años, podemos plantearnos de dónde ha venido esta agua, si se encontraba en la formación del planeta o si ha tenido orígenes extraterrestres. En todo caso, dado que la molécula de agua es simple químicamente (solo tres unidades) y que sus átomos son de bajo peso molecular, puede pensarse que sería de las primeras moléculas en formarse en un universo primigenio. Así, el estudio de cristales de circón ha permitido inferir que agua líquida debe haber existido en la Tierra desde hace al menos 4.400 millones de años, poco después de su formación.

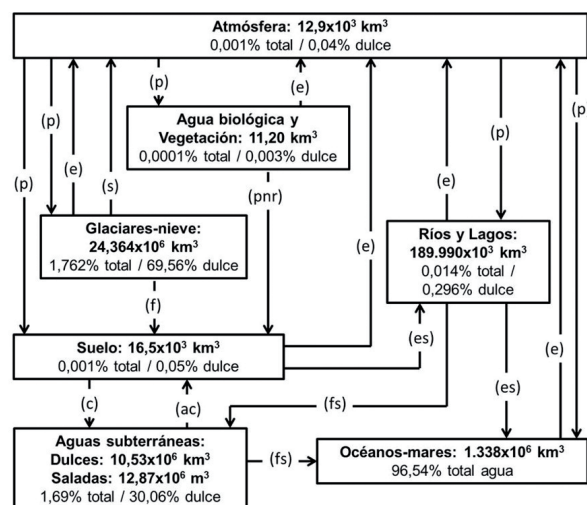


FIGURA 1. Ciclo hidrológico y principales flujos implicados: (p) precipitación; (e) evaporación; (f) fusión; (c) percolación; (ac) ascenso capilar; (es) escorrentía; (fs) flujo subterráneo; (s) sublimación; (pnr) lluvia no retenida por la vegetación.

No obstante, para responder a la cuestión planteada al principio podemos apoyarnos en la relación de las formas isotópicas existentes de la molécula de agua. Así, nos fijaremos específicamente en los dos isótopos de hidrógeno que pueden hallarse en una molécula de agua, es decir, hidrógeno (H, peso atómico 1) y deuterio (D, peso atómico 2).

Entendemos por agua pesada aquella que tiene deuterio (^2H o D) en lugar de hidrógeno (^1H), pudiendo expresarse químicamente su fórmula como $^2\text{H}_2\text{O}$ o D_2O (agua pesada). Por su parte, la fórmula del agua normal sería la conocida habitualmente como $^1\text{H}_2\text{O}$. Además, también puede existir mezcla isotópica de D e H en una fracción de moléculas de agua, con la fórmula asociada de DHO.

Dicho esto, la relación agua pesada/agua normal en el agua terrestre hoy día (océanos, ríos, a diferentes profundidades, incluso agua biológica) es de 1 átomo de deuterio por cada 6.410 de hidrógeno. Dicho de otra forma, en el agua normal solo existen unos 156 átomos de deuterio por cada millón de átomos de hidrógeno, lo que expresado de otra forma serían 156 ppm.

La posible fuente de agua terrestre debería tener un cociente similar, o algo inferior, contando con que se produce un ligero enriquecimiento en D (deuterio) de las masas de agua por fenómenos de escape preferencial de H al espacio al ser su masa más baja que la del deuterio. Podrían descartarse, en principio, las posibles fuentes en que la relación D/H fuese sensiblemente más elevada.

En suma, se plantean varios posibles orígenes para el agua de nuestro planeta: cometas, asteroides y otros cuerpos celestes, y agua endógena.

Cometas, asteroides y otros cuerpos celestes que impactaron sobre nuestro planeta

Según las últimas estimaciones disponibles, cuando se formó el universo también lo hicieron todo el hidrógeno y el deuterio (y gran parte de los elementos químicos actuales) con una relación entre ellos que apenas ha variado y que se estima en el orden de 20 ppm. Recientes estudios indican que la relación D/H en el sistema solar es más alta que la esperable, con lo que el agua del mismo en parte provendría de antes de su formación (unos 4.500 millones de años) y desde materiales anteriores al inicio de la misma y, por tanto, ya evolucionados y enriquecidos en D (el sistema solar es joven en relación al universo, 14.000 millones de años).

La mayor parte del agua de la primitiva proto-nebula que conformó el sistema solar, vía atracción gravitatoria, se acumuló en las zonas exteriores del mismo,



FIGURA 2. Recreación del impacto de un planetóide sobre la Tierra que fue el origen de la Luna (fuente, <https://pbs.twimg.com/media/Bq4qe67IQAA6Gtu?format=jpg&name=small>).

donde existen temperaturas más bajas y con una menor posibilidad de volatilización y descomposición de la misma, quedando las zonas próximas al Sol y los planetas gaseosos con poca cantidad relativa de agua. Así pues, se define una línea a nivel actualmente entre el cinturón de asteroides y Júpiter que separa ambas zonas de nuestro sistema planetario, la zona externa rica en agua y la zona interna pobre en agua.

La Tierra, en sus fases iniciales y dentro de la zona de escasez primordial de agua, debería contener poca por encontrarse con una alta proporción de materiales fundidos y a una temperatura muy elevada, además de sometida a fuerte irradiación UV que promovería el escape de hidrógeno (y agua) hacia el espacio. Además, en esta fase primitiva, hace unos 4.200 millones de años, parece ser que un objeto del tamaño de Marte impactó sobre nuestro planeta, resultando en la formación de la Luna, así como en la pérdida de las acumulaciones de agua que pudieran existir en superficie (**Figura 2**).

Se piensa que, entonces, una porción del planeta habría sufrido la fusión violenta de una o de dos áreas enormes. La composición litológica actual no justifica una fusión completa, ya que es difícil fusionar y mezclar totalmente masas rocosas enormes. Sin embargo, tal impacto habría vaporizado una fracción razonable de material y creado una atmósfera de roca-vapor alrededor del joven planeta. Rápidamente, en solo 2.000 años, se habría condensado esta mezcla de roca y vapor con sustancias volátiles calientes que, probablemente, constituirían una pesada atmósfera de CO_2 con H_2 y vapor de H_2O .



A pesar de la temperatura superficial de unos 230 °C, existían océanos de agua líquida propiciados por la elevada presión atmosférica de la pesada capa gaseosa de CO₂. A medida que continuaba el enfriamiento, en el agua oceánica ocurrían fenómenos de subducción y disolución que eliminaban la mayor parte del CO₂ de la atmósfera, e introducían agua en el manto terrestre.

Así mismo, se piensa que parte del agua actual habría viajado hacia la Tierra desde donde es más abundante, en forma de agua constituyente de los cometas exteriores, que contienen 200 veces más de agua que la de la Tierra en relación a su masa, o en forma de meteoritos o asteroides, de los cuales los más abundantes (condritas carbonáceas) la contienen en mayor proporción que la terrestre. Estos objetos cósmicos se concentran en la nube de Oort, una zona existente entre nuestro propio sistema solar y el de Alfa Centauri, el sistema solar más próximo.

Determinaciones cuantitativas de isótopos de hidrógeno en los cometas Halley, Hyakutake, Hale-Bopp y 67P/Churyumov-Gerasimenko, estudiadas por investigadores como David Jewitt, han encontrado que la relación D/H de estos cometas es aproximadamente el doble que la del agua oceánica.

Corroborando lo anterior, las elevadas relaciones D/H (>300 ppm) encontradas en muchos cometas con respecto a la hallada en el agua en nuestro planeta plantea que el origen del agua cometaria no sea el fundamental para el agua terrestre.

Otros posibles candidatos a suministrar agua a nuestro planeta son los asteroides. En muchos de estos la relación D/H es muy similar a la terrestre. Además, ciertos cuerpos celestes tales como el planeta enano Ceres, del que se estima que la mitad de su masa puede ser agua, podrían erigirse en parte de nuestros primeros suministradores acuáticos a través de su impacto en diversas fases geológicas de nuestro planeta. Así, se supone que sucesivos impactos de estos objetos hubieran alimentado gran parte de los nichos acuáticos existentes en nuestro planeta.

Finalmente, según Morbidelli, una gran parte del agua actual proviene de protoplanetas originados en el cinturón exterior de asteroides que se proyectaron hacia la Tierra, como lo indican las proporciones D/H en con-

dritas carbonáceas ya comentadas antes. El agua contenida en estas condritas revela una relación D/H razonablemente similar (excluida su esperable concentración) a la del agua de los océanos terrestres y coincide con la de las muestras extraídas de la Luna por las misiones Apolo de finales del siglo pasado.

Agua endógena

Aparte de lo dicho, queda la hipótesis del agua endógena. Recientes estudios sugieren que en el horizonte de una Tierra de 300 millones de edad, ya hubo agua líquida en la superficie planetaria. Así en la isla Baffin, en unas lavas solidificadas de remota antigüedad y aisladas del entorno desde su formación, se descubrieron compuestos cuya relación D/H debió ser similar a la del agua primordial de la Tierra: esa relación resultó algo inferior (20%) a la de los océanos terrestres y similar a la de la nebulosa protosolar germen de nuestro planeta.

En este sentido, existe una teoría que plantea que el agua se formó en el centro de la Tierra por reacciones a altas temperaturas (527 °C) entre átomos de hidrógeno y oxígeno del polvo cósmico primordial. Las moléculas formadas por esta reacción fueron expelidas a la superficie terrestre en forma de vapor (por la temperatura a la que se encontraban). Algo de este vapor de agua pasó a formar parte de la atmósfera primitiva (esta atmósfera primitiva carecía de oxígeno molecular), mientras que otra parte se enfrió y condensó para formar el agua líquida y sólida de la superficie terrestre. Este proceso tardó millones de años, pero las evidencias experimentales que se tienen actualmente plantean que el agua está presente en la Tierra hace más de 3.800 millones de años.

Como conclusión, una fuente muy importante de los 1.386 millones de km³ que tiene nuestro planeta parece residir en el propio manto terrestre, muy rico en agua y donde se encuentra ocluida en minerales (también actualmente), trasladándose desde aquí a la superficie vía erupciones volcánicas (tanto terrestres como marinas) y por generación de nueva corteza terrestre vía tectónica. Esa agua mantiene una relación D/H similar a la primordial, la cual se va incrementando progresivamente a los niveles actuales por su progresivo enriquecimiento en D a causa del escape progresivo

» Para responder a la interesante cuestión del posible origen del agua en la Tierra se hace uso de la relación isotópica D/H en diferentes masas de agua, tanto en nuestro planeta como en las posibles fuentes terrestres o extraterrestres

de átomos más ligeros de H al espacio, en especial por la descomposición del agua vía ultravioleta que se da en nuestro planeta (**Figura 3**).

Además, los fenómenos de subducción de placas tectónicas marinas cerrarían el ciclo geológico ingresando en el manto terrestre nuevas cantidades de materiales y de agua asociada. Con estos datos, no es aventurado esperar la existencia de muchos más planetas ricos en agua (y acaso en vida) en el resto del universo.

Al margen de lo anterior, el origen de una porción del agua terrestre habría podido ser bioquímico, mediante reacciones redox y quimiosintéticas, posteriormente a la existencia de vida en el planeta.

Así, ya en 1931, Van Niel descubrió que bacterias quimiótroficas metabolizadoras de sulfuros (bacterias púrpuras del azufre) eran capaces de fijar carbono y sintetizar agua como subproducto, usando ácido sulfhídrico y dióxido de carbono según la reacción:



CONCLUSIONES

El agua se puede encontrar en la Tierra en los tres estados físicos de agregación de la materia (líquida, sólida y gaseosa) con un volumen total de 1.386 millones de km³, de los cuales un 2,53% (35,03 millones de km³) corresponde a agua dulce.

Para responder a la interesante cuestión del posible origen del agua en la Tierra se hace uso de la relación isotópica entre el deuterio y el hidrógeno (D/H) en diferentes masas de agua, tanto en nuestro planeta como en las posibles fuentes terrestres o extraterrestres.

Así la relación (D/H) actual en el agua terrestre es de 156 ppm, es decir, isótopos de D por millón de átomos de hidrógeno, partiendo de una relación de unos 20 ppm en la formación del universo, y llegando a unos 300-400 ppm en agua encontrada en cometas.

Con estos datos se formula la hipótesis de que una parte del agua en nuestro planeta está asociada a la formación del mismo hace unos 4.500 millones de años en la zona de nuestro sistema solar próxima al Sol y con baja proporción de agua en cuerpos celestes allí ubicados. Este proceso se dilató durante los primeros cientos de millones de años del planeta.

Otra parte se incorporó por un impacto catastrófico de un planeta del tamaño de Marte que provocó una o dos áreas de fusión de nuestro joven planeta, dando lugar al nacimiento de la Luna y a la condensación de grandes masas de agua sobre la superficie. Además, el

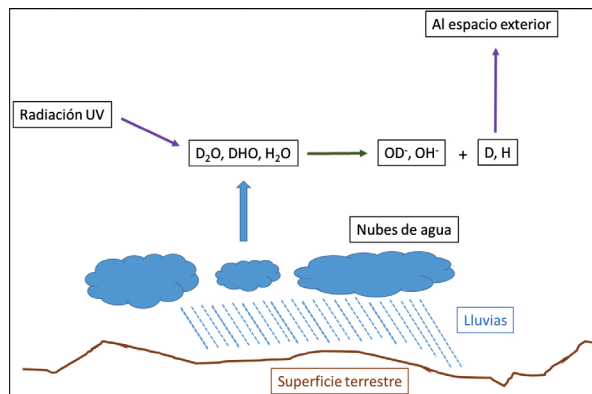


FIGURA 3. Fotólisis de moléculas de agua vía radiación UV con escape de hidrógeno y deuterio al espacio exterior.

aporte de agua en asteroides y planetoides parece hoy día que fue más relevante que el de cometas.

Asimismo, y una vez asentada la vida orgánica en nuestro planeta, procesos microbianos en ambiente anaerobio vía quimiosíntesis también aportaron otra parte del agua actual.

Finalmente, la descomposición de agua vía irradiación UV va generando pérdidas de agua al espacio exterior que se contrapesan con el aporte de agua ocluida en materiales aflorados desde el manto terrestre por fenómenos de tectónica de placas y erupciones volcánicas.

Bibliografía

- [1] Aguilera Monchón, J.A. (2017). El agua en el cosmos. Ed. RBA, Villatuerta (Navarra).
- [2] Ball, P. (2007). H₂O. Una biografía del agua. Ed. Turner, Madrid.
- [3] Bruesch, P. (2012). Agua, su importancia en las ciencias, en la naturaleza y cultura, religiones del mundo y en el universo. Ed. Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich (Suiza).
- [4] Chang, K. (2008). A new picture of the early Earth. The New York Times.
- [5] Cowen, R. (2013). Common source for Earth and Moon water. Nature. doi: 10.1038/nature.2013.12963.
- [6] Drake, M.J. (2005). Origin of water in the terrestrial planets. Meteoritics & Planetary Science (John Wiley & Sons), núm. 40 (4), págs. 519-527. Bibcode:2005M&PS...40..519D. doi:10.1111/j.1945-5100.2005.tb00960.x.
- [7] European Space Agency (2014). Herchel discovers water vapour around dwarf planet Ceres.
- [8] Genda, H.; Ikoma, M. Origin of the ocean on the Earth: early evolution of water D/H in a hydrogen-rich atmosphere. Accessible at <http://arxiv.org/abs/0709.2025>.
- [9] Gómez-Caballero, J.A.; Pantoja-Alor, J. El origen de la vida desde un punto de vista geológico. <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/index.php/component/content/article/191-sitio/articulos/tercera-epoca/5601/869-5601-5-gomez>.
- [10] http://enciclopedia.us.es/index.php/Origen_del_agua_en_la_Tierra.
- [11] <https://noticiasdelaciencia.com/art/38403/el-origen-del-agua-en-la-tierra>.
- [12] Marín Galván, R. (2018). Físicoquímica y microbiología de los medios acuáticos. Tratamiento y control de calidad de aguas. Ed. Díaz de Santos, 2ª edición, Madrid.
- [13] Morbidelli, A. et al. (2000). Meteoritics & Planetary Science, núm. 35, págs. 1.309-1.329.
- [14] Powell, A. (2014). How Earth was watered. En: <http://phys.org/news/2014-02-earth.html#jCp>.
- [15] Sarafian, A.R.; Nielsen, S.G.; Marschall, H.R.; McCubbin, F.M.; Monteleone, B.D. (2014). Early accretion of water in the inner solar system from a carbonaceous chondrite-like source. Science, núm. 346 (6.209), págs. 623-626.
- [16] Van Niel, C.B. (1931). Photosynthesis of bacteria. Arch. Mikrobiol., núm. 3 (1).