

# ¿Dónde está el xenón que falta en la atmósfera de nuestro planeta?



**El análisis químico de los meteoritos que más se parecen a la materia primigenia que dio lugar a la formación de nuestro planeta revela que la Tierra tiene menor concentración del gas xenón de la que debería esperarse. El origen de esta deficiencia podría estar relacionado con la solubilidad de los gases nobles en las vacantes de oxígeno de la estructura perovskita del silicato de magnesio,  $MgSiO_3$ , principal componente del manto terrestre.**

Luis Ortega San Martín\*

Es muy probable que el lector no conozca que aún existen preguntas sin responder por los geoquímicos y astroquímicos respecto a la composición química de nuestro planeta. Estas preguntas, la del título es un ejemplo (hay menos Xe en la atmósfera terrestre de lo esperado), son muy importantes para validar las teorías de formación de nuestro planeta. Aunque a un ritmo pausado, las preguntas van encontrando respuesta poco a poco. Este año, parece que la incógnita del xenón perdido ha sido encontrada.

Por curioso que parezca, la respuesta al misterio del xenón está conectada con los materiales que forman los condensadores eléctricos de su laptop o tableta e incluso con los materiales del ánodo de las pilas de combustible de óxido sólido que compañías como eBay o Google tienen instaladas en sus centrales en California (EEUU). Todas, además, están relacionadas con el principal componente del interior de nuestro planeta, el silicato de magnesio. ¿Cómo es eso posible? En realidad, la respuesta se encuentra en el ordenamiento atómico de todas las sustancias anteriores: todos los materiales indicados pueden describirse con una fórmula química general  $AMO_3$  (donde A y M son dos elementos diferentes y O representa al oxígeno) y tienen una estructura cristalina conocida como de tipo perovskita (Figura 1).

Las sustancias con estructura tipo perovskita se conocen desde 1839, año en que el geólogo alemán Gustav Rose describiera el mineral homónimo, Perovskita. Desde entonces, toda sustancia con el mismo ordenamiento atómico básico de este mineral se conoce como perovskita. Desde su descubri-

\* Luis Ortega es profesor de Química del Departamento de Ciencias de la PUCP. Es Doctor en Química y ha publicado diversos artículos científicos en el área de ciencia de materiales. (e-mail: lortegas@pucc.edu.pe)

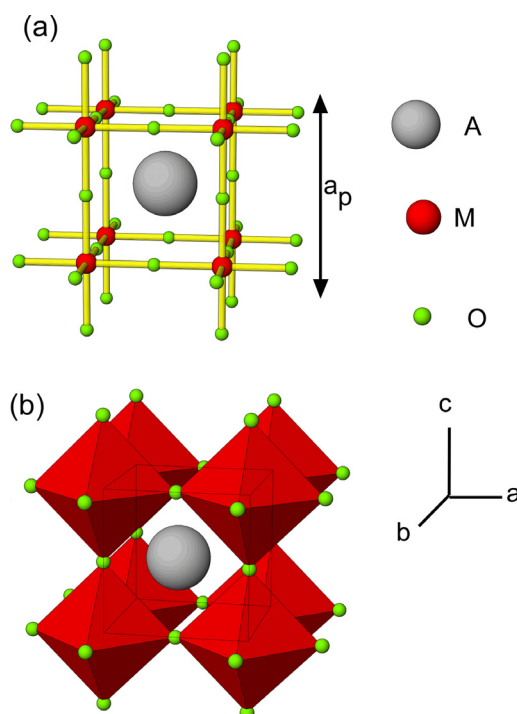


Figura 1. Ordenamiento atómico ideal en una estructura tipo perovskita con simetría cúbica. (a) modelo de bolas y barras, (b) modelo de poliedros de coordinación (elaboración propia).

miento, este mineral fue un quebradero de cabeza para los cristalógrafos, quienes no fueron capaces de ponerse de acuerdo respecto al ordenamiento correcto de sus átomos hasta más de cien años después, a finales de la década de 1940. Fruto de las divergencias y discusiones que se establecieron entre los investigadores de la época, quienes se dedicaron a preparar decenas de compuestos con fórmula general  $AMO_3$ , el número de sustancias con estructura perovskita fue creciendo de forma exponencial con los años. Así fue como se pudo observar que

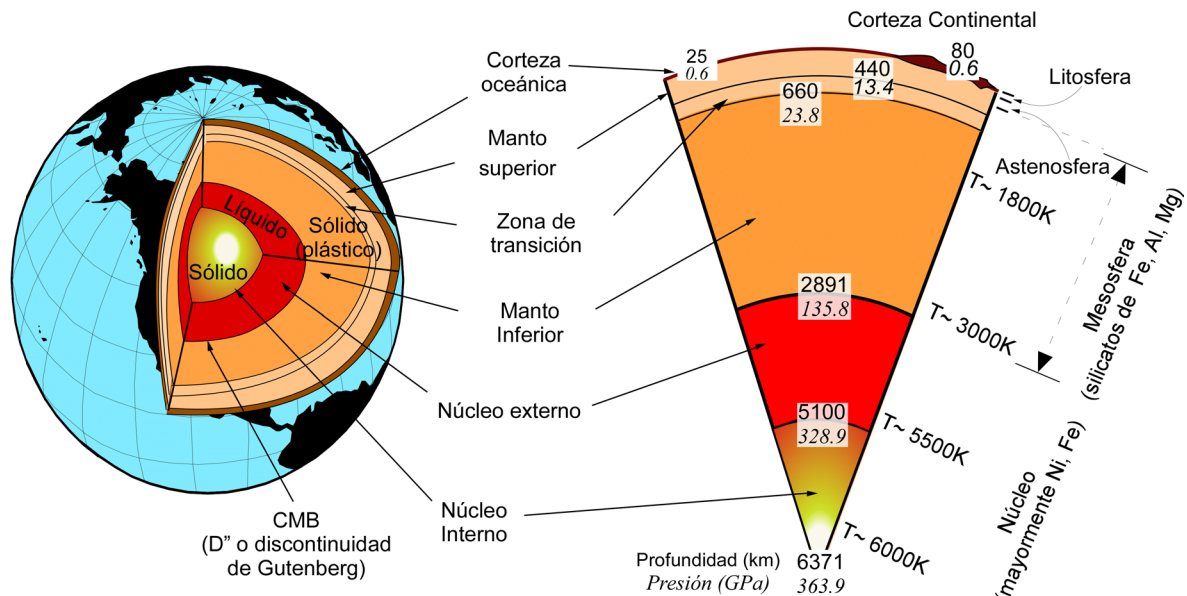


Figura 2. Representación esquemática de las diferentes capas que conforman el planeta tierra. Se indican profundidades, composiciones aproximadas y presiones (gráfico basado en la información de la referencia 4).

esta es una de las estructuras cristalinas con más variantes entre todas las conocidas.<sup>1</sup>

De hecho, hoy en día sabemos que la estructura tipo perovskita es capaz de alojar prácticamente cualquier elemento de la tabla periódica si se cumple una serie de requisitos de tamaños entre los constituyentes. Esa capacidad implica que es posible preparar innumerables compuestos de fórmula general  $AMO_3$  donde A y M pueden ser elementos discretos o combinaciones más complicadas de los mismos ( $A_{1-x}A'_xM_{1-y}M'_y$ , por ejemplo). En consecuencia, es posible preparar sustancias con una gran diversidad de propiedades y, por supuesto, aplicaciones. Tal es así que una gran parte de los condensadores cerámicos más comunes en electrónica contienen derivados del compuesto  $BaTiO_3$  (con diferentes grados de sustitución en las posiciones del Ba y del Ti), el cual es uno de los mejores materiales dieléctricos conocidos.<sup>2</sup> Compuestos similares (de fórmula general  $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ , con diferentes valores de x, e incluso con sustituciones en la posición del Mn) son usados también en las primeras pilas de combustible de óxido sólido (SOFC) que se comercializan hoy en día. Compañías como eBay o Google poseen los primeros dispositivos comercializados por Bloom Energy,<sup>3</sup> que funcionan con este tipo de compuestos.

Las propiedades de los materiales con estructura tipo perovskita citados anteriormente se conocen desde hace más de 60 años. Lo que no se conocía entonces es que esa estructura, encontrada en pocos minerales en la superficie terrestre, pero muy fácil de preparar en el laboratorio, es también la estructura cristalina más extendida en nuestro planeta. En efecto, desde finales de la década de los años 1970 se sabe que el

manto inferior terrestre (que se extiende desde 650 km de profundidad hasta 2900 km) está compuesto, principalmente, por el compuesto  $MgSiO_3$ . Este mineral, no observable en la superficie porque solo es estable a muy altas presiones, posee estructura tipo perovskita y constituye la mayor parte del manto inferior, ocupando cerca del 50% del volumen total de nuestro planeta.<sup>4</sup> Si se desea saber qué pasó con el Xe debemos conocer un poco más del interior de nuestro planeta.

## La perovskita $MgSiO_3$ , la formación de la tierra y los gases nobles

Según las teorías actuales, la Tierra empezó a formarse hace unos 4500 millones de años por medio de un proceso conocido como acreción (crecimiento por agregación de pequeños cuerpos celestes).<sup>4</sup> Una vez formado el cuerpo principal se asume que la mayor parte de la Tierra estaba fundida y tenía una composición homogénea. Con el tiempo, sin embargo, se produjo una diferenciación geoquímica de los materiales primigenios en su interior. El resultado fue que los materiales se distribuyeron en capas concéntricas según las afinidades químicas de los elementos constituyentes y las condiciones de presión y temperatura existentes (Figura 2). Por esta razón, los elementos más densos (metales como el hierro y el níquel, junto con algunos metales nobles como el oro) se situaron en las partes más profundas y los más ligeros (silicatos y óxidos de diversos elementos como Ca, Al, Mg, Na y Fe) en las capas superiores. Las capas más externas solidificaron y los gases atrapados durante la acreción se fugaron poco a poco, desgasificándose el interior del planeta.

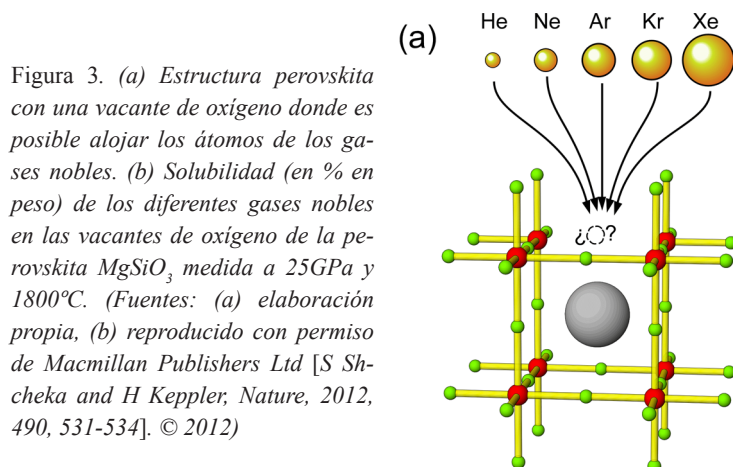
La validación de esta teoría por medio de ensayos químicos de la composición del planeta es muy complicada (por-

1. Mitchell, R. H. "Perovskites modern and ancient". Almaz Press: Ontario, 2002.

2. Bhalla, A.S. y col, *Mater Res. Innov.*, 2000, 4(1), 3-26. (📄)

3. Bloom Energy Company. Customers web page. (📄 acceso: noviembre 2012).

4. Varios Autores: "Our ever changing Earth". *Scientific American (special edition)*, 2005, 15(2), 1-105. (📄)



que no podemos llegar más que a unos pocos km por debajo de la corteza terrestre para hacer análisis), pero se han podido establecer unas composiciones aproximadas que coinciden, razonablemente bien, con las de cierto tipo de meteoritos que han caído en nuestro planeta. Los astroquímicos consideran que el origen estelar de estos meteoritos es el mismo que el de los componentes iniciales de la Tierra. Sin embargo, han surgido algunas incompatibilidades que no han podido ser bien explicadas, lo cual ha generado dudas y muchas preguntas.

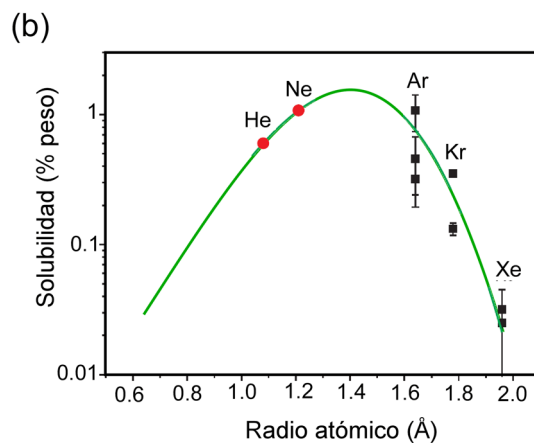
## El enigma del xenón perdido

Una de las preguntas que aún quedaba sin respuesta involucra al gas xenón. Resulta que, cuando se hace una comparación entre la concentración de gases nobles en los meteoritos y la composición de nuestra atmósfera, esta última presenta una concentración de xenón bastante inferior a la que sería esperada. Sin embargo, el resto de los gases nobles están representados como deberían. ¿Implica eso que la Tierra no se formó como se creía?

Nada más lejos de la realidad. Al menos, eso es lo que se desprende del estudio realizado por Shcheka y Keppler, investigadores alemanes del Instituto Geofísico de la Universidad de Bayreuth.<sup>5</sup> Según los autores del estudio, la explicación se encuentra en la estructura perovskita del silicato  $MgSiO_3$ . La composición de este silicato puede representarse como  $Mg_{1-x}Fe_xSiO_{3-\delta}$ , donde  $x < 1$  y  $\delta$  es una medida de las vacantes de oxígeno. En las condiciones del interior del manto terrestre, las vacantes en la posición del oxígeno son numerosas. Los estudios de Shcheka y Keppler han mostrado que los gases nobles, en las condiciones de alta presión que existen en el manto terrestre, pueden ocupar los huecos dejados por el oxígeno en la estructura perovskita del  $MgSiO_3$  y quedar, de este modo, atrapados en la misma (Figura 3a). Debido a que el tamaño del hueco en la estructura es proporcional al radio iónico del ión  $O^{2-}$ , solo aquellos gases nobles con un tamaño adecuado pueden ocupar ese espacio. Como puede verse en la figura 3b, los

5. S Shcheka y H Keppler, *Nature*, 2012, 490, 531-534. (📄)

6. Extnance, A.: "Perovskite posits answer to xenon riddle" *Chemistry World*, 11 octubre 2012. (📄 acceso: noviembre 2012).



experimentos llevados a cabo muestran que la solubilidad del xenón en la perovskita es mínima (es demasiado grande para el hueco), mientras que la del resto de gases es muy superior.

Debido a que el xenón apenas es atrapado por la perovskita, los investigadores proponen que, en las etapas iniciales de la formación del planeta, cuando aún todo estaba fundido, solo aquellos gases que podían encajar en el espacio del ión  $O^{2-}$  quedaron retenidos en el interior. De este modo, cuando el manto empezó a solidificarse, y se fue desgaseando, solo aquellos gases que fueron inicialmente atrapados pudieron fugarse hasta la atmósfera, quedando esta con una gran deficiencia de xenón.

Lo interesante de esta propuesta es que difiere de todas las existentes: las teorías actuales proponen que el xenón que falta en la atmósfera podría estar atrapado en algún lugar aún no encontrado de la Tierra. Shcheka y Keppler, sin embargo, proponen que el xenón nunca llegó a estar en nuestro planeta porque no cabe en el espacio dejado por las vacantes de oxígeno del silicato  $MgSiO_3$ . De este modo, es posible explicar por qué nuestra atmósfera tiene tan poco xenón, que es un gas pesado y de baja fugacidad, pero sí cantidades apreciables de otros gases mucho más livianos como el argón, el kriptón, el helio o el neón que, por esta razón, deberían estar en menor concentración.

Como se puede ver, la estructura perovskita ha ayudado a encontrar una posible respuesta a una pregunta incómoda, aunque no ha ayudado a encontrar el xenón extraviado. Esa parece una batalla perdida: "Nunca encontraremos todo el xenón que se perdió en la Tierra" ha indicado el autor principal del estudio, Svyatoslav Shcheka.<sup>6</sup> Lo que sí esperamos encontrar son nuevas sorpresas en el apasionante mundo de las perovskitas, una estructura a la que no se le resiste ya casi ningún elemento de la tabla periódica.

### Bibliografía esencial

- Shcheka S y Keppler, H.: "The origin of the terrestrial noble-gas signature" *Nature*, 2012, 490, 531-534. (📄)
- Mitchell, R. H. "Perovskites, modern and ancient". Almaz Press, Ontario, 2002. (📄)