

Juan Daniel Pérez Orozco, Giovanni Sosa Ceballos y José Luis Macías Vázquez

¿Es posible encontrar agua en el manto terrestre?

El manto terrestre tiene “agua” en forma de hidroxilo (OH^-), alojado en la estructura molecular de minerales anhidros, específicamente en el manto superior y en la zona de transición. Las estimaciones de la cantidad de agua en el manto consideran que si todos los OH^- se pudieran unir y formar agua (H_2O), habría de una a cinco veces los océanos de la superficie terrestre.

El manto y la zona de transición

El manto es una porción del interior de la Tierra limitada en la parte superior por una capa delgada, que es la corteza, y debajo por un núcleo externo líquido formado principalmente por hierro y níquel. El espesor del manto es de 2900 km (véase la Figura 1). La temperatura es de 1000 °C cerca del límite con la corteza y de hasta 3700 °C en las zonas cercanas al núcleo externo. La presión llega a ser de 24 GPa (gigapascas), unas 237000 at (atmósferas), en la parte inferior del manto. La inmensa presión y las altas temperaturas hacen que las rocas del manto estén calientes y, en zonas profundas, estén parcialmente fundidas, lo que provoca un comportamiento plástico con variaciones en la viscosidad y densidad y, por lo tanto, éstas fluyen lentamente –en una escala de millones de años–.

Los estudios de geofísica (sismología) enfocados en el interior de la Tierra identifican varias capas que conforman el manto: el manto superior, una zona de transición y el manto inferior (véase la Figura 1). El manto superior abarca desde la superficie terrestre hasta los 410 km de profundidad. Dos subcapas dividen al manto superior con diferente densidad y viscosidad: la litosfera y la astenosfera. La primera abarca desde la superficie terrestre hasta los 100 km de profundidad, consta de roca sólida e incluye la corteza litosférica (corteza oceánica y continental) y el manto litosférico. La litosfera flota por encima de la astenosfera debido a su menor viscosidad, esto provoca un movimiento lento en las rocas de la litosfera y genera la actividad tectónica (sismos, formación de montañas y erupción de volcanes). Por otra parte, la astenosfera abarca desde los 100 hasta 410 km debajo

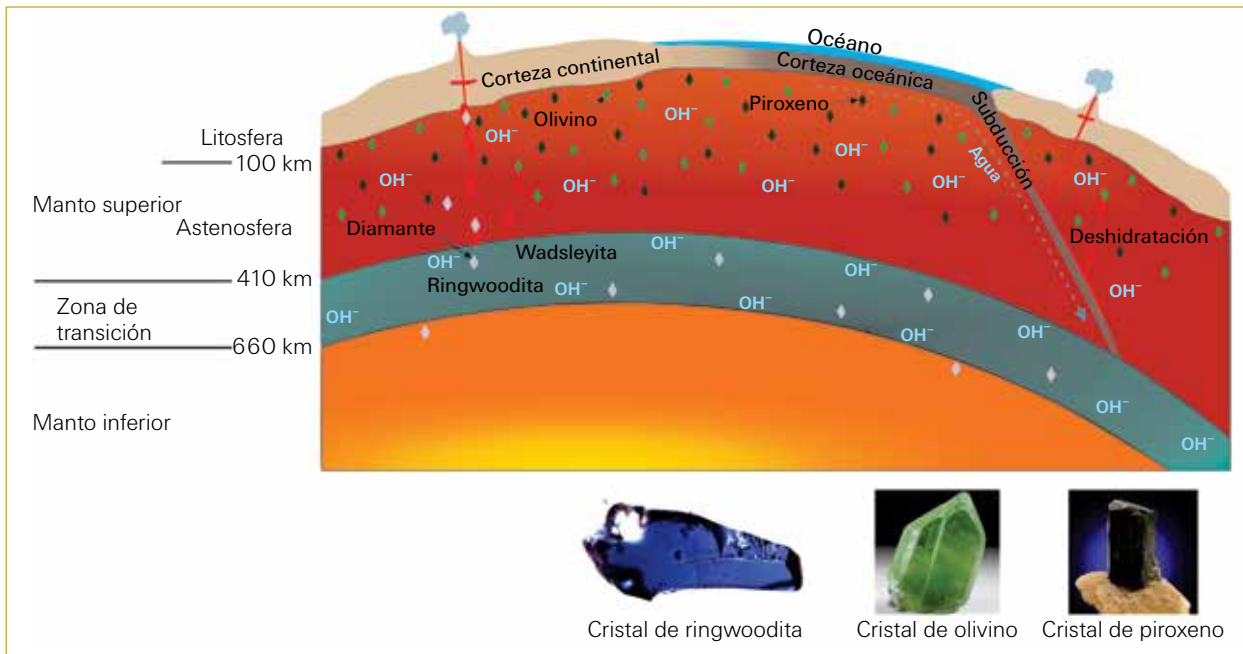


Figura 1. Se muestra la estructura del manto terrestre, con la ubicación y el espesor del manto inferior, la zona de transición y el manto superior. La zona de transición es abundante en hidroxilo; si se considera que 0.1% de esta zona es agua, habría tanta como en los océanos terrestres. La evidencia de agua en el manto se encuentra en minerales de ringwoodita incrustados en cristales de diamante, así como en minerales anhidros, como olivino y piroxeno (en el manto superior) con OH⁻ en su estructura molecular. En la parte inferior de la figura se muestran fotografías de cristales de ringwoodita (Joe Smyth, <www.mindat.org>), olivino y piroxeno (<www.minerals.net>).

de la superficie. La alta presión y la temperatura en esta zona generan rocas parcialmente fundidas que se comportan de forma dúctil o plástica.

Por debajo de la astenosfera está la zona de transición, donde el manto superior cambia gradualmente hasta el manto inferior. La zona de transición se localiza entre los 410 y 660 km debajo de la superficie. Las rocas en esta zona son densas debido a que sufren una transformación radical; no se funden ni desintegran a causa de la alta presión, sino que modifican su estructura cristalina.

Por debajo de esta zona, el manto inferior tiene una extensión de 660 a 2900 km debajo de la superficie. Ahí las rocas son más calientes que en el manto superior y la zona de transición; pero, aunque teóricamente el calor ablanda las rocas, la intensa presión mantiene al manto inferior en forma sólida.

■ El origen del agua en el manto

■ Diversas teorías explican el origen del agua en el manto. Una de ellas afirma que cuando la Tierra co-

menzó a formarse (hace unos 4500 millones de años) los minerales de hierro y níquel abandonaron el material fundido para formar el núcleo, y el material que se quedó rodeando al núcleo construyó el manto. Después de millones de años, el manto comenzó a enfriarse y el agua permaneció atrapada dentro de los minerales. El material fundido salió a la superficie en forma de lava por erupciones volcánicas; el agua que se encontraba en este material se **desgasificó**, lo cual provocó la formación de los océanos.

Existe otra teoría que relaciona el origen del agua en el manto con el proceso de subducción de placas. Las zonas de subducción son lugares donde dos placas tectónicas chocan una con otra. Una vez que se formaron los océanos, una placa tectónica densa (corteza oceánica), cargada de sedimentos marinos con agua, se desplazó por debajo de otra placa de menor densidad (corteza continental); cuando los minerales de la corteza que subduce entraron en el manto, sufrieron un proceso de deshidratación que permitió la entrada de agua y otros **volátiles**. De esta forma, toneladas de agua son transportadas al

Desgasificación

Escape de gases volcánicos hacia la atmósfera durante una erupción. Se libera dióxido de carbono, flúor, azufre, cloro y vapor de agua; este último es el gas más abundante en el proceso.

Volátiles

Gases disueltos en el líquido magmático. Cuando la presión disminuye, los volátiles se separan del líquido magmático y forman gases.

manto y retornadas a la atmósfera por el proceso de desgasificación por medio de erupciones volcánicas. Este ciclo —a escala geológica— es del orden de cientos de millones de años de duración.

la zona más profunda del manto también contiene agua; sin embargo, la ausencia de material físico de esta zona del manto no permite corroborarlo.

La presencia de agua en el manto tiene consecuencias petrológicas y volcánicas, pues rompe las estructuras de los minerales fácilmente, lo que afecta al proceso de fusión del manto (véanse la Figura 2 y el Recuadro 1). El material fundido o magma de este proceso asciende y eventualmente hace erupción en la superficie terrestre, y con ello forma volcanes. La fusión del manto ocurre durante millones de años a profundidades de entre 80 y 100 km. El descubrimiento de agua indica que el proceso de fusión del manto podría ocurrir en la zona de transición, debido a que el agua disminuye la temperatura de fusión. Así lo han demostrado estudios de laboratorio en rocas, puesto que para fundir un trozo de roca seca a una presión determinada se requieren aproximadamente 1000 °C, y si a esta misma roca se le agrega 0.1% de agua, la temperatura de fusión disminuye 100 °C.

■ **¿Dónde y en qué forma se encuentra el agua en el manto?**

Las diferentes zonas del manto contienen abundantes cantidades de agua, pero no en su forma común (líquida, sólida y gaseosa), sino atrapada en radicales de ion hidroxilo (OH^-) que forman parte de la estructura de los minerales característicos del manto superior, como el olivino y el piroxeno (Kovács, 2008), y en la zona de transición (véase la Figura 1), en minerales como ringwoodita y wadsleyita, que son minerales **polimorfos** de olivino, los cuales se han encontrado como **inclusiones** en diamantes (Schmandt y cols., 2014; Pearson y cols., 2014) a profundidades mayores de 610 km. La estructura del ensamble mineral del manto inferior sigue que

Polimorfos

Minerales que tienen la misma composición química, pero en condiciones diferentes de presión y temperatura cambian a una estructura cristalina diferente. El olivino modifica su estructura y se transforma en ringwoodita y wadsleyita.

Inclusiones

Pequeñas porciones líquidas, sólidas o gaseosas alojadas en un cristal. En este caso, se hace referencia a las inclusiones sólidas o diminutos cristales que fueron encapsuladas cuando cristalizó el mineral.

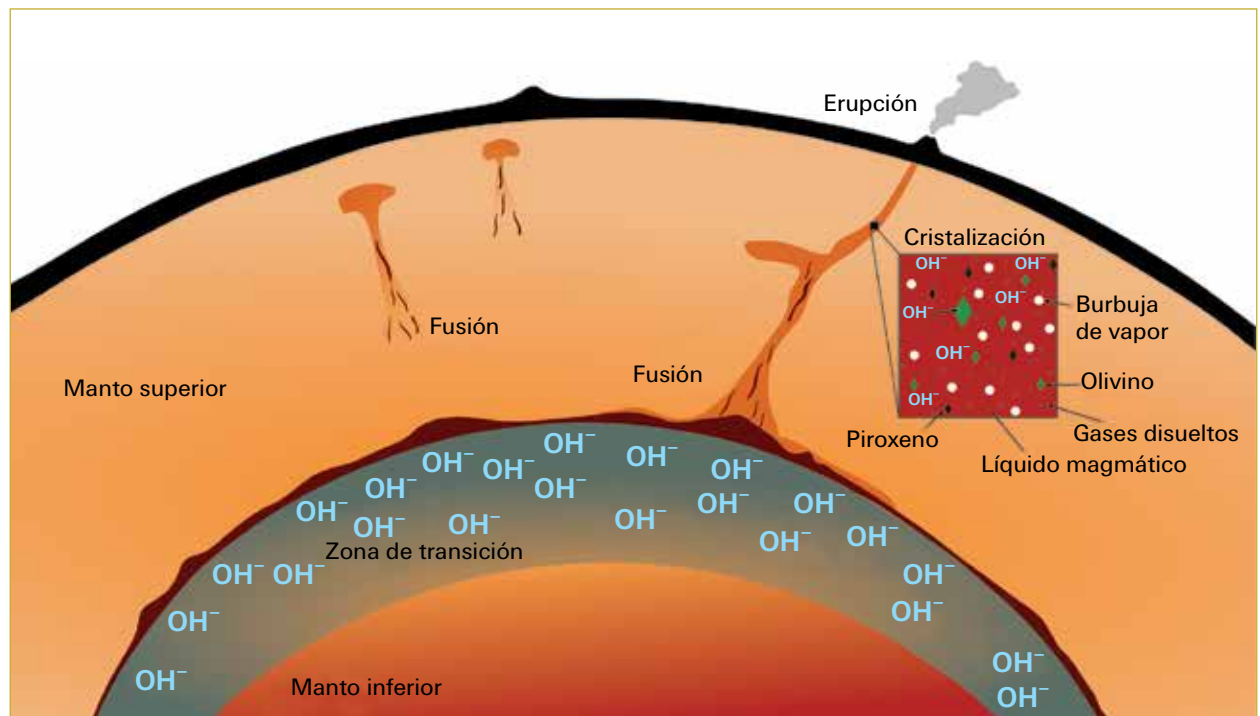


Figura 2. Fusión del manto e introducción de OH^- en los cristales de olivino y piroxeno del manto superior. El líquido magmático, producto de la fusión del manto, asciende a zonas someras del manto donde la presión y temperatura descienden, y ahí ocurre el proceso de cristalización. Durante la cristalización, el OH^- puede sustituir al Si^{4+} y entrar en la estructura molecular de los minerales olivino y piroxeno del manto superior. Los minerales salen a la superficie terrestre en las erupciones volcánicas y representan una pequeña muestra física del manto.

El líquido magmático, producto de la fusión en el manto, es una combinación de elementos químicos, entre los que destacan: silicio y oxígeno, aluminio, hierro, calcio, sodio, magnesio y potasio. El ascenso del líquido magmático (véase la Figura 2) hacia partes someras del manto, donde la presión y temperatura descienden, provoca que los átomos generen estructuras cristalinas complejas. El silicio y el oxígeno unidos por enlaces químicos forman una estructura conocida como tetraedro de silicio (véase el Recuadro 2). Cuando comienza el enfriamiento, los tetraedros se unen entre sí y se complementan con otros elementos químicos, para desarrollar minerales conocidos como silicatos. Por lo tanto, los minerales que cristalizaron de este líquido magmático, como olivinos y piroxenos, pueden tener concentraciones de hidroxilo en su estructura.

La clasificación de silicatos de acuerdo con la existencia de OH^- en su estructura molecular produce dos grupos: hidratados y anhidros. Los minerales hidratados tienen OH^- en su fórmula química y su concentración de agua es reportada en porcentaje en peso. En cambio, los minerales anhidros tienen trazas de OH^- y carecen de OH^- en su fórmula química (véase el Recuadro 3). Los piroxenos y olivinos que forman el manto, y sus polimorfos formados a alta presión y temperatura, son minerales anhidros y son los que contienen el mayor volumen de agua (en forma de OH^-) que existe en nuestro planeta.

La adición de OH^- en los minerales puede debilitar su estructura molecular o mantenerla estable. El hidroxilo es una molécula de agua incompleta que sólo necesita la adición de un protón para completarse y unirse a la estructura molecular en las condiciones en que cristaliza un mineral. Los enlaces de silicio-oxígeno (Si-O) que unen a los átomos en los silicatos pueden romperse debido a la presencia de agua, y el átomo de silicio puede quedar fuera de la estructura molecular. El espacio vacío que deja el catión de silicio (Si^{4+}) se reemplaza por hidrógeno: $\text{Si}^{4+} = 4\text{H}^+$, o bien una combinación de hidrógeno con otro átomo similar al silicio (radio iónico y carga iónica): $\text{Si}^{4+} = \text{Al}^{3+} + \text{H}^+$, $\text{Si}^{4+} = \text{B}^{3+} + \text{H}^+$, $\text{Si}^{4+} = \text{Li}^{3+} + \text{H}^+$.

Recuadro 1. Fusión del manto y magma

La fusión del manto derrite parcialmente una roca sólida sometida a presión, y puede ocurrir por varios procesos: por un aumento de temperatura, por una disminución de la presión (las rocas, al descomprimirse, pueden fundirse, ya que aumentan su volumen y forma), o bien por la presencia de agua y otros volátiles (gases). El magma o material fundido consta de tres partes: una combinación de elementos químicos en solución –también llamado líquido magmático (forma líquida)–, cristales (forma sólida) y gases o volátiles (forma gaseosa).

Recuadro 2. Tetraedro de silicio

El tetraedro de silicio (SiO_4) tiene cuatro átomos de oxígeno y uno de silicio. Esta unidad representa la estructura cristalina base de los silicatos. Los silicatos o grupo de silicatos son una unión de varios tetraedros de silicio (véase la Figura 3). Cada tetraedro se une a otro en diferentes estructuras (anillos, cadenas simples y dobles o estructuras aisladas). Representan el mayor número de minerales existentes en la Tierra.

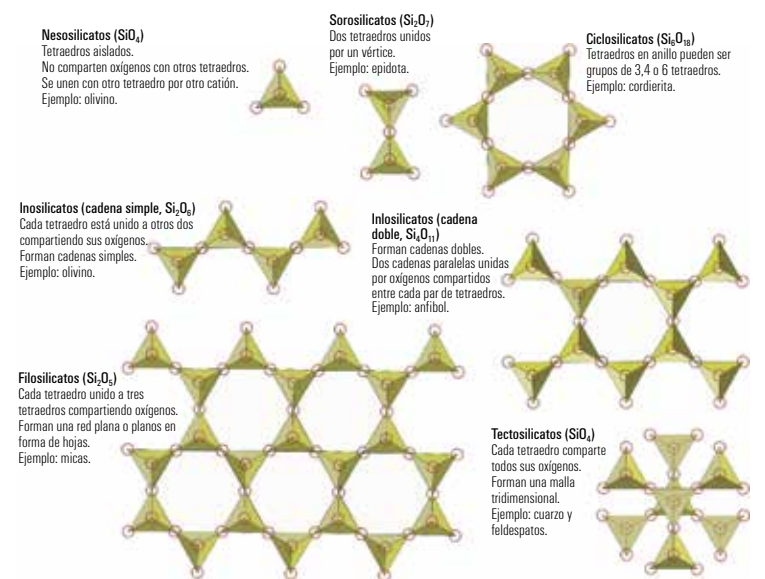


Figura 3. Grupo de los silicatos: tetraedros de silicio (triángulos color amarillo) y átomos de oxígeno (círculos color rojo). Estos minerales tienen como base estructural la unidad del tetraedro de silicio, la cual se repite y se une con otras al compartir electrones entre los oxígenos, lo que hace que se formen diferentes estructuras cristalinas: unidades aisladas, unidades dobles, anillos, cadenas simples, cadenas dobles, planos, así como estructuras tridimensionales. La composición química y propiedades físicas, mecánicas y eléctricas de cada silicato dependen de su estructura cristalina.

Recuadro 3. Fórmula química de olivinos y piroxenos

Las fórmulas químicas de los minerales anhidros carecen de hidroxilo (OH^-), como en el caso del olivino: $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$; y del piroxeno: $(\text{Ca, Mg, Fe, Mn, Na})(\text{Al, Fe, Mn, Cr, Ti})(\text{Si, Al})_2\text{O}_6$, pero contienen trazas de agua, al igual que la ringwoodita (Mg_2SiO_4) y la wadsleyita (Mg_2SiO_4) –estos últimos con mayores concentraciones de agua–; por lo tanto, algunos especialistas sugieren añadir el OH^- en las fórmulas químicas de estos minerales (Smyth y cols., 1991; Kovács y cols., 2010).

La técnica de infrarrojo en la identificación de OH^-

La técnica analítica que identifica el OH^- en las estructuras cristalinas de los minerales anhidros del manto es la espectroscopia de infrarrojo (véase la Figura 4). Mediante esta técnica se miden las vibraciones de los átomos unidos por enlaces químicos debido a la interacción con la luz de infrarrojo, la cual es parte del espectro de radiación electromagnética. Tres regiones espectrales dividen al espectro de infrarrojo entre longitudes de onda desde 33 hasta $12\,800\text{ cm}^{-1}$: infrarrojo lejano (de 33 a 400 cm^{-1}); infrarrojo medio (de 400 a $4\,000\text{ cm}^{-1}$), utilizado en componentes orgánicos e inorgánicos, como las mediciones de agua en minerales; e infrarrojo cercano (de $4\,000$ a $12\,800\text{ cm}^{-1}$).

El espectrómetro genera una luz infrarroja e interactúa con un cristal (mineral). Los átomos unidos por enlaces vibran a una frecuencia característica cuando son iluminados por la luz infrarroja; los enlaces en silicatos (Si-O) vibran a frecuencias entre $1\,500$ y $2\,100\text{ cm}^{-1}$, y los enlaces oxígeno-hidrógeno (O-H) vibran entre las frecuencias $3\,000$ a $3\,700\text{ cm}^{-1}$ (región OH). La luz de infrarrojo puede ser reflejada o absorbida por las vibraciones en los enlaces químicos. La absorción (cantidad de energía absorbida por la muestra) sirve para determinar el OH^- y las sustituciones con H^+ . Con esta técnica se obtiene un espectro que registra la cantidad de absorción de una muestra por cada longitud de onda; por lo tanto, cada especie de silicato genera un espectro diferente que lo identifica. Asimismo, los intercambios O-H por algún catión en la estructura del tetraedro de silicio también tienen una vibración diferente que produce en el espectro un pico de absorción en la región OH. El pico en una longitud de onda dada indica el elemento que está sustituyendo al silicio, y el área por debajo de ese pico indica la concentración de OH^- (véase la Figura 4).

Durante más de 30 años, las investigaciones con espectroscopia de infrarrojo han detectado numerosas sustituciones en la estructura molecular de los minerales anhidros. Las sustituciones más sencillas de explicar ocurren en minerales del manto como el olivino y el piroxeno:

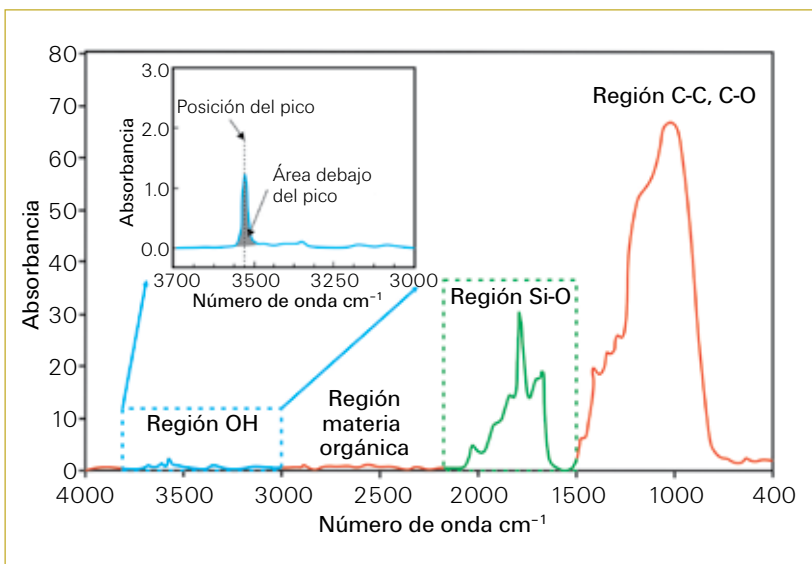


Figura 4. La región del espectro de infrarrojo se encuentra entre las longitudes de onda desde 400 hasta $12\,800\text{ cm}^{-1}$. Para determinar la presencia de OH^- en cristales se utiliza una porción de este espectro (infrarrojo medio: 400 a $4\,000\text{ cm}^{-1}$). La figura presenta el espectro en absorbancia de un cristal de olivino. En el espectro se pueden identificar distintas zonas: 1) la región relacionada a los enlaces carbono-carbono (C-C) o carbono-oxígeno (C-O) por lo general no es usada (500 a $1\,500\text{ cm}^{-1}$); 2) la zona en color verde está relacionada con los silicatos o enlaces silicio-oxígeno (Si-O) que tienen frecuencias de vibración entre $1\,500$ y $2\,100\text{ cm}^{-1}$; 3) la región donde se encuentran los enlaces con elementos como carbono, nitrógeno, oxígeno y carbono-hidrógeno (C-H) están relacionados a la materia orgánica presente en la muestra (de $2\,000$ a $2\,500\text{ cm}^{-1}$); y 4) en la región de color azul es donde se dan sustituciones oxígeno-hidrógeno (O-H) (región OH; de $3\,000$ a $3\,700\text{ cm}^{-1}$). Los intercambios de O-H por algún catión en la estructura del tetraedro de silicio tendrán una vibración característica en la región OH; el número de onda donde ocurre el pico indicará qué elemento está sustituyendo al silicio y el área por debajo (en gris) de ese pico será la concentración de OH^- .

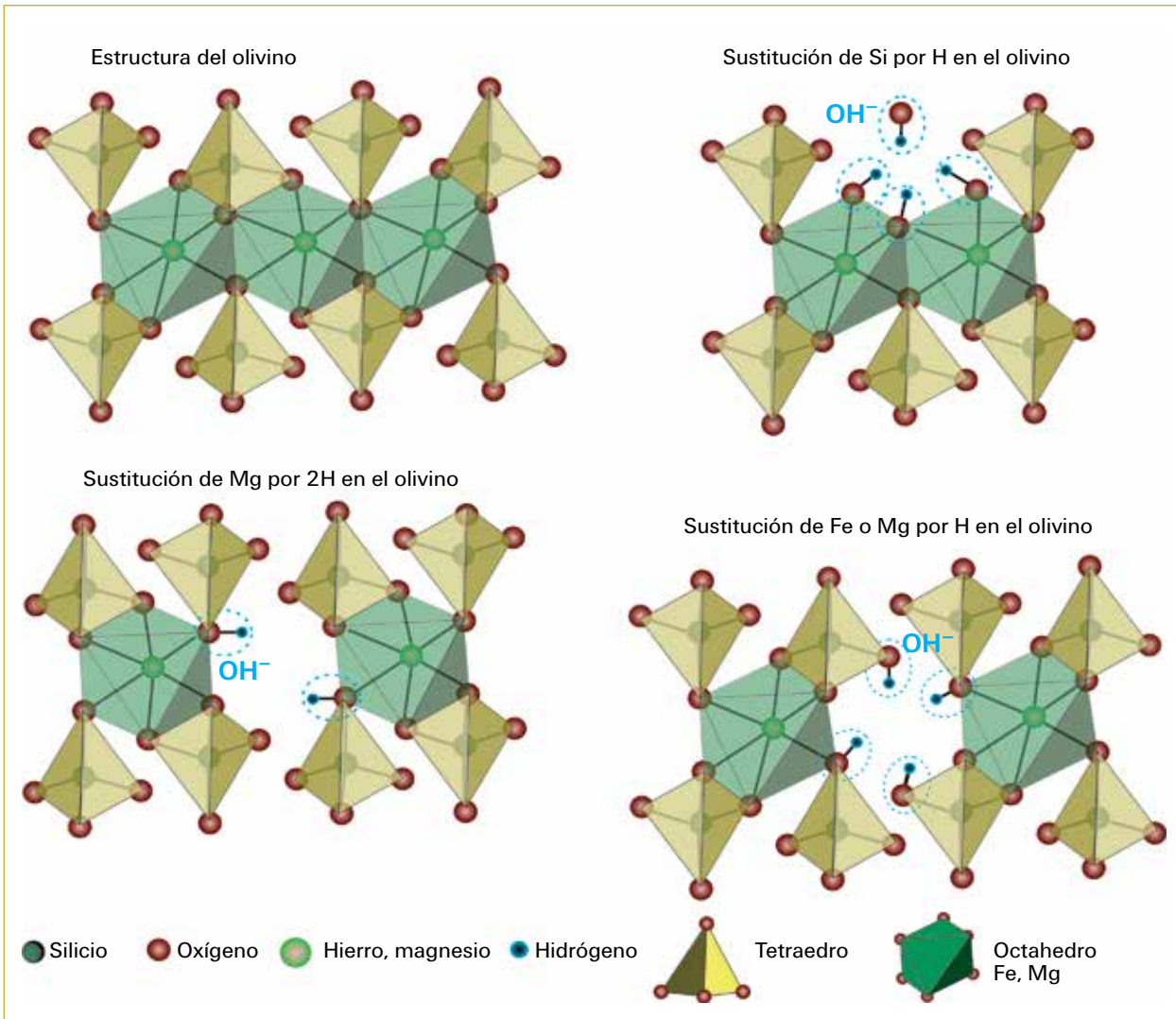


Figura 5. Estructura del olivino, formado por tetraedros aislados que están unidos por otros átomos, como el hierro y el magnesio. Estos átomos están rodeados por seis oxígenos, por lo que forman un octaedro. En la estructura cristalina del olivino ocurren sustituciones de H⁺ complejas que resultan difíciles de imaginar; sin embargo, pueden ocurrir sustituciones por Si⁴⁺ = 4H⁺, o alguno de los elementos de hierro o magnesio que forma un octaedro pueden ser reemplazados por 2H⁺ o 4H⁺ y, de igual forma, ocurrirá una compensación de carga en la cual se presentará el ion hidroxilo.

Las estructuras de tetraedros aislados desarrollan al olivino (véase la Figura 5), y éstos están unidos por otros átomos, como el hierro y el magnesio, rodeados por seis oxígenos en un octaedro.

Las estructuras de cadenas simples de tetraedros forman el piroxeno; los tetraedros comparten átomos de oxígeno entre sí formando una cadena, y los átomos de hierro o magnesio (octaedros) unen dos cadenas de tetraedros.

Aunque en el piroxeno ocurren sustituciones por hidroxilo (Skogby y Rossman, 1989), la estructura

simple del olivino permite ejemplificar las sustituciones complejas por OH⁻ (Kovács y cols., 2010) en las cuales el Si⁴⁺ puede ser sustituido por 4H⁺ (véase la Figura 5), así como también los átomos de hierro y magnesio pueden ser sustituidos por H⁺ para generar los iones hidroxilo.

En México, diversos grupos de investigación han aplicado la espectroscopia de infrarrojo para caracterizar minerales y el contenido de agua en **inclusiones magmáticas**. Desde 2018, con el apoyo del proyecto GEMEX, el grupo de Petrología del Instituto

Inclusiones magmáticas

Dentro de los minerales, pequeñas burbujas que contienen gases y líquidos magmáticos que fueron atrapados cuando ocurrió la cristalización. Idealmente, representan la composición del líquido magmático del que provienen los minerales.

Recuadro 4. El agua en los minerales está en forma de OH⁻

Resulta imposible extraer y convertir el hidroxilo (OH⁻) de los minerales en agua líquida para el consumo humano. Aunque son millones y millones de cristales en el manto con OH⁻ en su estructura molecular, es energéticamente inviable extraer el agua de los cristales, además de que no tenemos acceso a porciones abundantes del manto.



de Geofísica, Unidad Michoacán, de la Universidad Nacional Autónoma de México, fue el primero en Latinoamérica en usar esta técnica analítica para detectar OH⁻ en cristales anhidros (cuarzos y feldespatos) de depósitos volcánicos, como **ignimbritas**. Los minerales de estos depósitos pueden perder su contenido de OH⁻ por procesos de deshidratación, pero la concentración de hidroxilo retenida en los cristales puede variar desde la base hasta la cima del depósito. Si el comportamiento del OH⁻ es homogéneo entre distintos niveles verticales, indica una sola erupción; si es heterogénea y varía en distintos horizontes verticales, sugiere varias erupciones.

Ignimbrita

Roca volcánica formada por el depósito de un flujo piroclástico; esto es, una nube densa caliente que contiene ceniza, fragmentos de rocas, gases y pómez (roca vesicular de vidrio volcánico), producto de una erupción volcánica explosiva.

■ ¿Cuál es la cantidad de agua en el manto?

■ Los piroxenos y olivinos pueden contener desde 60 hasta 400 ppm de OH⁻ (Qiu y cols., 2018), mientras que los polimorfos de olivino contienen hasta 1.5% de OH⁻ (Pearson y cols., 2014). Mediante estudios realizados con espectroscopia de infrarrojo en minerales de olivino del manto superior se ha calculado que dentro de su estructura molecular pueden existir hasta 400 ppm de agua (H₂O) (Qiu y cols., 2018). La concentración de agua estimada en estudios de conductividad eléctrica en combinación con estudios de petrología experimental en minerales es de <0.09% H₂O en el manto superior y 0.1% H₂O en la zona de transición (Pearson y cols., 2014). Ahora, considerando que la masa del manto superior y de la zona de transición (615 y 415 × 10²¹ kg, respectiva-

mente) tiene en conjunto 0.1% de agua, la masa de agua que habría en unos cuatrillones de minerales anhidros (como olivinos, piroxenos y ringwoodita), comparada con la masa de agua en los océanos, sería de uno hasta cinco océanos terrestres juntos (Genda, 2016).

Sin embargo, recordemos que ésta no es agua líquida como la de los océanos, pues las estimaciones se basan en el supuesto de que los OH⁻ se podrían unir y formar H₂O, pero ya sabemos que esto es imposible debido a que están en la estructura de los minerales (véase el Recuadro 4). La concentración de agua en el manto es difícil de determinar de manera exacta, puesto que es inasequible muestrear físicamente el manto —extraer un pedazo de roca—; no obstante, las erupciones volcánicas proveen conductos para que algunos de los millones de minerales del manto ocasionalmente lleguen a la superficie terrestre en forma de **xenolitos** incrustados en lavas, y éstos nos proporcionen evidencia de la concentración de hidroxilo del manto.

■ Implicaciones de la presencia de agua en el manto

■ La estructura molecular de los minerales posee la evidencia de que existe agua en el manto, en forma abundante, en la zona de transición y el manto superior. Como mencionamos, no es el agua común y corriente que podemos beber en un vaso, sino que se

Xenolitos

Fragmentos de roca que quedan atrapados cuando el magma asciende a la superficie.

encuentra en forma de hidroxilo y ocupa o sustituye espacios entre los átomos de los cristales. Pero el hecho de encontrar agua en el manto, en una cantidad mayor a la de los océanos terrestres, significa que se modifiquen sus propiedades físicas: aumenta o disminuye la velocidad de las ondas sísmicas; también disminuye su conductividad y viscosidad; debilita la estructura molecular de los minerales; reduce la temperatura de fusión; cambia la viscosidad y densidad de las rocas. Además, la presencia de agua afecta la forma en que hacen erupción los volcanes, ya que si un magma tiene muchos volátiles disueltos, como el agua, provocará erupciones muy potentes que ponen en peligro la vida de los seres vivos y la infraestructura social. Estos factores influyen en la dinámica del manto y, por ende, modelan la superficie e impactan de manera indirecta en la forma en que conocemos y habitamos la Tierra.

Los autores agradecemos al proyecto del Fondo de Sustentabilidad Energética del Conacyt-Sener (2015-04-268074), en particular al subproyecto PT 4.4 por las facilidades otorgadas; asimismo, a la M. C. Nancy Magaña García por sus valiosos comentarios y por la revisión cuidadosa que ha realizado de este texto.

Juan Daniel Pérez Orozco

Posgrado en Ciencias de la Tierra, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México.

juandan.perez@gmail.com

Giovanni Sosa Ceballos

Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México.

giovannis@igeofisica.unam.mx

José Luis Macías Vázquez

Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México.

jlmacias@igeofisica.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Genda, H. (2016), "Origin of Earth's oceans: An assessment of the total amount, history and supply of water", *Geochemical Journal*, 50(1):27-42.
- Kovács, I. (2008), Water in the nominally anhydrous minerals of the upper mantle: Analytical and experimental developments (tesis de doctorado), Canberra, Australian National University. Disponible en: <<https://openresearch-repository.anu.edu.au/handle/1885/109960>>, consultado el 19 de mayo de 2020.
- Kovács, I., H. S. C. O'Neill, J. Hermann y E. H. Hauri (2010), "Site-specific infrared OH absorption coefficients for water substitution into olivine", *American Mineralogist*, 95(2-3):292-299.
- Pearson, D. G., F. E. Brenker, F. Nestola, J. McNeill, L. Nasdala, M. T. Hutchison y B. Vekemans (2014), "Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond", *Nature*, 507(7491): 221-224.
- Qiu, Y., H. Jiang, I. Kovács, Q. K. Xia y X. Yang (2018), "Quantitative analysis of H-species in anisotropic minerals by unpolarized infrared spectroscopy: An experimental evaluation", *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 103(11): 1761-1769.
- Schmandt, B., S. D. Jacobsen, T. W. Becker, Z. Liu y K. G. Dueker (2014), "Dehydration melting at the top of the lower mantle", *Science*, 344(6189):1265-1268.
- Skogby, H., y G. R. Rossman (1989), "OH⁻ in pyroxene; an experimental study of incorporation mechanisms and stability", *American Mineralogist*, 74(9-10): 1059-1069.