

Circón: un pequeño gran mineral

Agustín Ortiz¹

¹Instituto de Bio y Geociencias del NOA (IBIGEO, UNSa – CONICET). e-mail: agustinortiz13@hotmail.com

¿Qué es el circón?

El circón o zircón es un mineral formado por silicato de zirconio, cuya fórmula química es $ZrSiO_4$. El tamaño medio de los granos de circón en las rocas suele ser de 50-300 μm (micrómetros) (0,05-0,3 mm) (Figuras 1, 2a y b).

Algunos circones de mayor tamaño y pureza, tienen calidad de gema. El circón también es utilizado en la industria como materia prima del metal zirconio, empleado en la fabricación de aceros especiales, abrasivos y reactores de aviones. También con este material se fabrican cuchillos resistentes y de gran filo (incluso más cortantes que los de acero). Asimismo, se utiliza en la fabricación de pigmentos para cerámica y en odontología estética, entre otros usos.

Por su similitud con diferentes radios iónicos, el catión Zirconio (Zr) puede ser sustituido por diferentes cationes en su red cristalina (estructura donde se ordenan los átomos). Algunos de estos cationes son radioactivos, como ser los de Uranio (U), Torio (Th), Helio (He), Lutecio (Lu), Hafnio (Hf), entre otros elementos.

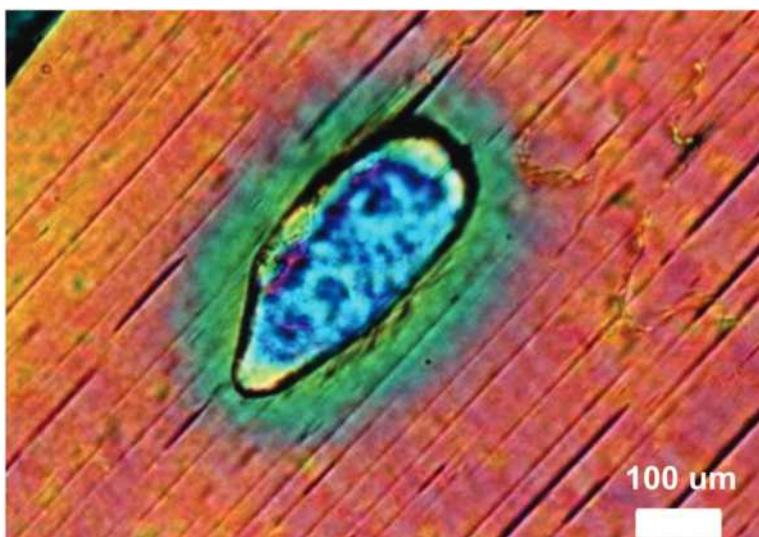


Figura 1. Un corte delgado de roca, se puede ver un circón a través del microscopio. Fuente imagen: <http://www.alexstrekeisen.it/pluto/zircone.php>.

Estos tipos de cationes, generan alteraciones radioactivas en la red cristalina del circón que es fácilmente perturbada. A partir de esto, y gracias a los avances científicos y tecnológicos, una aplicación muy útil del circón es en la geología, en una rama denominada geocronología (ciencia encargada de determinar la edad y sucesión cronológica de eventos geológicos a lo largo de la historia de la Tierra).

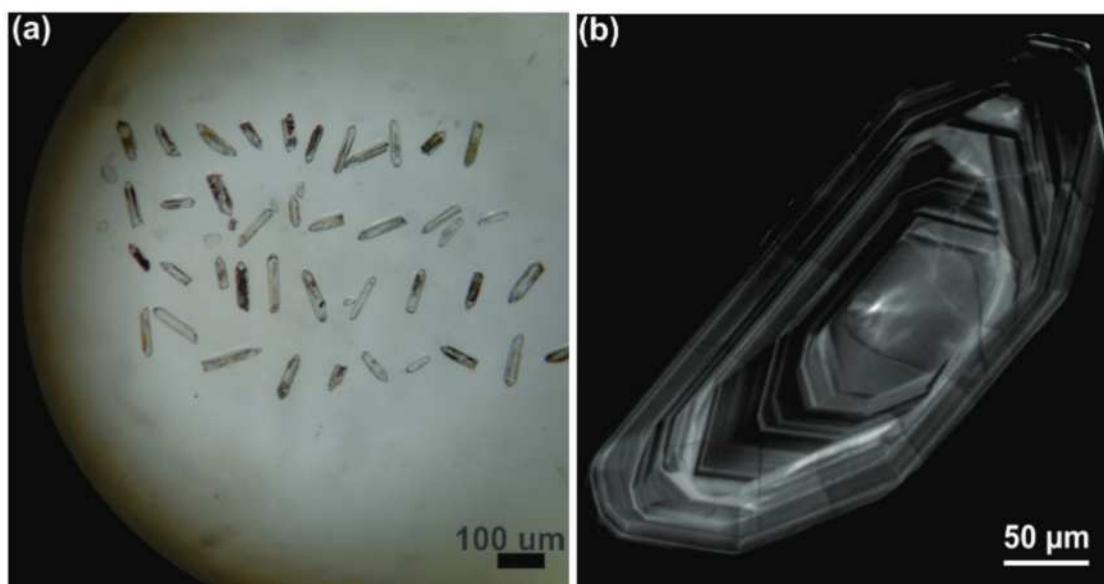


Figura 2. a) Fotografía tomada desde la lupa binocular, se observan los circones de un granito del sur de la Puna salteña, Argentina. Notar que la barra de escala tiene 100 µm, es decir, 0,1 mm (b) Imagen de un circón tomada a partir de un microscopio electrónico, donde se ve una textura oscilatoria típica de los circones.

En la geocronología, los circones son usados como cronómetros, ya que, conociendo la edad de los circones, se determina la edad de la roca que los contiene. Entonces, si se conocen las edades de diferentes rocas que se formaron en ciertos eventos geológicos claves, como ser, extinciones de especies, caída de meteoritos (ver [Hauser, 2021. Temas B&GNOA, vol. 11, n°1](#)), erupciones volcánicas, formación de cadenas montañosas, origen de rocas, construcción y destrucción de supercontinentes, se puede asociar la edad obtenida con estos eventos. Por ejemplo, recientemente Ortiz y colaboradores (2017), por medio de la datación en circones, pudieron determinar que el Complejo Diablillos en la Puna Salteña es tan antiguo como 515 millones de años aproximadamente.

Ahora bien, ¿cómo se llega a determinar la edad de una roca que tiene aproximadamente 515 millones de años, a partir de un mineral microscópico? Veamos...

Geocronología: minerales, isótopos radioactivos, vida media

Como ya fue mencionado, la geocronología emplea el método de datación radiométrica de isótopos radioactivos, para conocer la edad de rocas, minerales y hasta restos orgánicos.

Los isótopos son elementos químicos que tienen el mismo número atómico (Z =número de protones) pero distinta masa atómica (A = protones + neutrones), o sea, los isótopos de un mismo elemento tienen distinto número de neutrones en su núcleo (Figura 3). Por ejemplo, el número atómico del Hidrógeno (${}^A_Z\text{H}$) es 1, este elemento tiene tres isótopos naturales, el ${}^1_1\text{H}$ (Protio), ${}^2_1\text{H}$ (Deuterio), ${}^3_1\text{H}$ (Tritio) (Figura 3), otro ejemplo es el Potasio, ${}^{39}_{19}\text{K}$, ${}^{40}_{19}\text{K}$, ${}^{41}_{19}\text{K}$. No todos los isótopos son estables, a estos se les llaman inestables, estos isótopos expulsan partículas y energía, lo que se conoce como radiación o radiactividad, y se convierten así en un elemento diferente. Ambos elementos, el isótopo inestable y su producto, son denominados elemento "padre" e "hijo", respectivamente (Figura 4). Todo esto ocurre en un tiempo determinado, dándoles su utilidad como cronómetros.

ISÓTOPOS DEL HIDRÓGENO

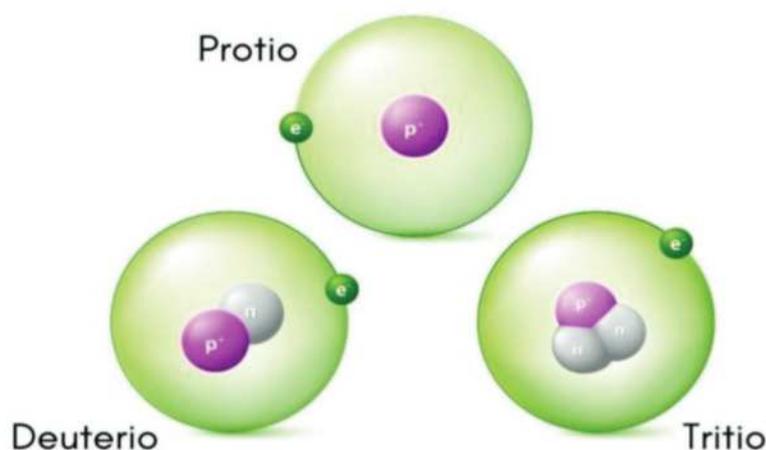


Figura 3. Estructura atómica de los isótopos del Hidrógeno. Nótese el mismo número de protones (p+) pero diferente número de neutrones (n) en el núcleo. (e-): electrones. Fuente imagen: <https://www.lifeder.com/deuterio/>

El método se basa en analizar la cantidad de un elemento isotópico inestable padre (núcleo radioactivo original) de ocurrencia natural dentro del material (roca, mineral, fósil, etc.) y cuánta cantidad se formó de un elemento isotópico hijo (producto de descomposición, núcleo estable, no radioactivo) a partir de la emisión radioactiva (alfa, beta, entre otras) (Figura 4). Generalmente, el núcleo hijo también es radioactivo, lo que resulta en una nueva desintegración, esto continúa hasta llegar a la formación de un núcleo hijo estable. Las desintegraciones sucesivas forman una cadena de desintegración que se caracteriza por tener una vida media distinta (para mayor detalle ver [Arzadún, 2020. Temas B&GNOA, vol.10, n°3](#)).

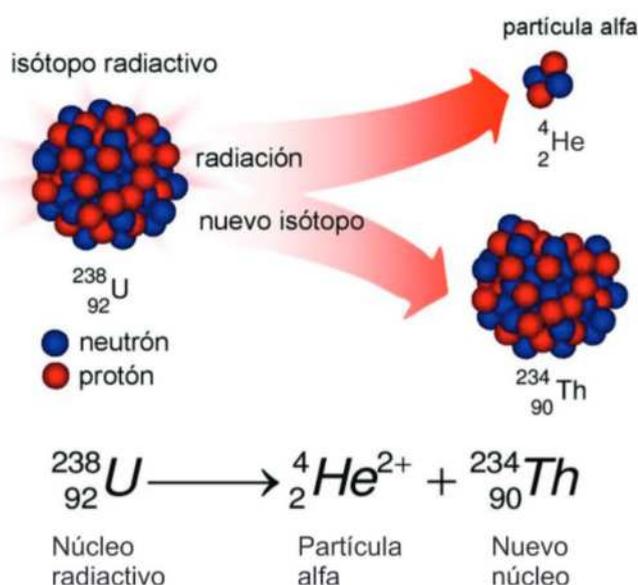


Figura 4. Un isótopo radiactivo inestable de Uranio (elemento padre) emite partículas alfa (radioactividad o radiación), dando lugar a la formación del elemento Torio (elemento hijo). Imagen modificada de Timberlake, 2008. Química. Segunda Edición. Pearson Educación

Los núcleos radioactivos decaen exponencialmente a una tasa descrita por un parámetro conocido como vida media (en años). Este es el tiempo que le lleva a la mitad de los núcleos radioactivos padres, desintegrarse en un núcleo hijo. Cada elemento isotópico tiene su vida media característica, que puede durar segundos, minutos, días, años o incluso, millones de años. Por ejemplo, la vida media del ${}^{238}\text{U}$ es de $4,5 \times 10^9$ años (o sea, ~4.500 millones de años). Mientras que la vida media del ${}^{234}\text{Pa}$ (Protactinio) es de 1,17 minutos.

La vida media es utilizada para determinar los diferentes métodos de datación radiométrica a utilizar, según la escala de tiempo en la que son precisos y de los materiales en los que se pueden aplicar. Los métodos pueden ser U-Pb (Uranio-Plomo), K-Ar (Potasio-Argón), Rb-Sr (Rubidio-Estroncio), Sm-Nd (Samario-Neodimio), Lu-Hf (Lutecio-Hafnio), la datación por desintegración de ${}^{14}\text{C}$ Carbono (utilizada para datar restos orgánicos relativamente recientes, de hasta 60 mil años), entre otros.

Desde sus inicios los métodos radioactivos han sido usados para datar una variedad de eventos importantes en la naturaleza. El método Rb-Sr fue el primer método descubierto, allá por el año 1938, mientras que el método K-Ar es utilizado, por ejemplo, para datar erupciones volcánicas muy jóvenes por lo menos de 100 mil años. Por otro lado, el Sm-Nd se usó inicialmente para conocer la edad de la Luna. Estas dataciones se obtienen a partir de minerales como feldespatos potásicos (aluminosilicatos de Potasio y Sodio), biotitas (aluminosilicatos de Potasio, Magnesio y Hierro) y anfíboles (aluminosilicatos de Calcio, Magnesio y Hierro).

Para resolver la pregunta inicial, a lo largo de esta contribución se tratará en mayor detalle el método U-Pb, que abarca un amplio rango de edades, desde muy antiguas hasta algunas bastante jóvenes -geológicamente hablando- de ~5 millones de años. Y justamente el mineral clave para este método es el circón, altamente resistente a distintos procesos de alteración y elevadas temperaturas, lo que es una gran ventaja para el método. Cabe destacar que este método también es utilizado en otros minerales como titanita (Silicato de Calcio y Titanio), monacita (Fosfato de Cerio y Tierras Raras), entre otros, ya que estos minerales también pueden alojar Uranio en su estructura cristalina. Cada uno con distintos usos geológicos, los cuales no se discutirán aquí.

Volviendo al método de datación U-Pb, como ya fuera mencionado, en la red cristalina del circón, el catión Zr puede ser fácilmente sustituido por U y Th, ya que tienen tamaños y propiedades similares. Allí, el U se comporta como un núcleo padre para desintegrarse en Pb (hijo), con una cadena de desintegración en el medio. Este método utiliza tres sistemas de decaimiento independientes en el mismo mineral: el ^{238}U a ^{206}Pb , ^{235}U a ^{207}Pb , ^{232}Th a ^{208}Pb . Dicho esto, conociendo la cantidad de elementos padre e hijo en la muestra, el tiempo de vida media, a través de fórmulas y cálculos matemáticos, se obtiene la edad del circón analizado. El lector es referido a la bibliografía seleccionada al final de la nota para más información sobre las fórmulas y cálculos matemáticos.

Resuelto cómo funciona el método radiométrico, avancemos para ver cómo llegamos a los resultados.

Espectrómetros de masa

Para obtener los resultados se utilizan distintas técnicas, pero todas basadas en los espectrómetros de masa.

Lo primero que se realiza es el estudio en el campo, en donde se recolectan las muestras de rocas de interés que mejor representan a la unidad estudiada, y que luego serán analizadas por el método radiométrico (Figura 5). Posteriormente, las rocas seleccionadas son molidas y tamizadas. El polvo obtenido es lavado con agua en una batea, para concentrar aquellos minerales más pesados. Luego los concentrados de minerales de circón y otros minerales pesados, son extraídos con un separador magnético. La purificación final de las muestras es lograda a partir de la selección manual de los circones con una aguja de acupuntura, usando una lupa binocular (Figura 6a).

Los circones seleccionados son montados en moldes y fijados con una mezcla para formar resina (Figura 6b). Una vez que la resina se seca completamente, al cabo de un día aproximadamente, cada molde es pulido para que las superficies de los circones queden expuestas para su posterior análisis en el espectrómetro de masa (Figura 7).



Figura 5. (a) Imagen panorámica de la Sierra de Inca Viejo y el salar de Diablillos, Puna salteña, Argentina, donde se estudiaron las rocas graníticas. (b) Imagen de un granito estudiado en los alrededores del Salar de Diablillos, Puna salteña, Argentina. Esta roca fue datada por el método U-Pb, con una edad de ~515 millones de años.

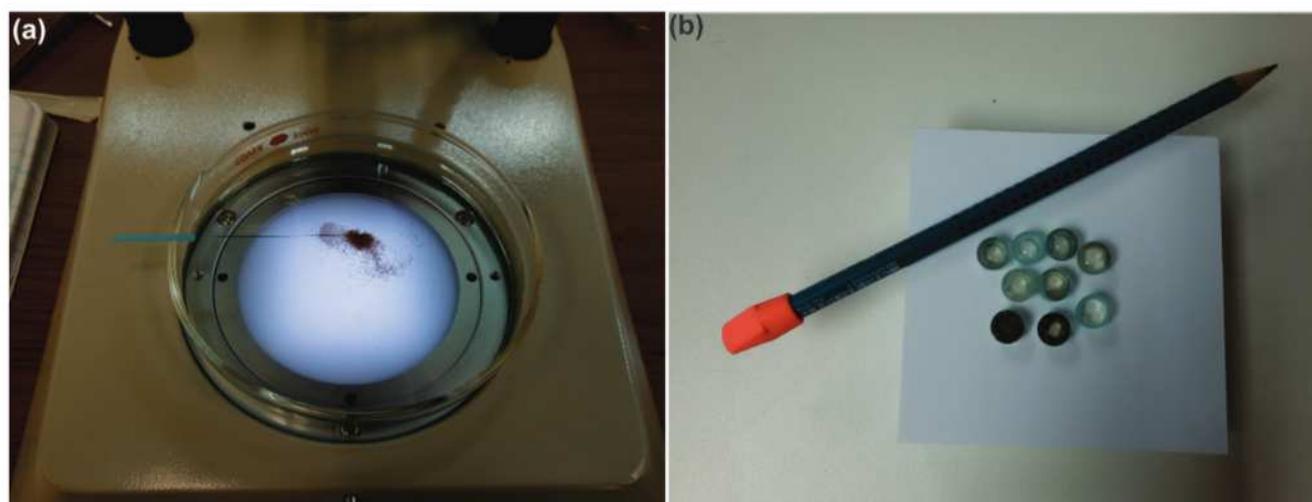


Figura 6. (a) Se observa un concentrado mineral, donde se seleccionan los circones. Una aguja de acupuntura como escala. (b) Ejemplo de las muestras con los circones en sus respectivos moldes, listos para ser analizados. Un lápiz hace de escala.

El espectrómetro de masa es un instrumento que permite analizar con alta precisión la composición de un mineral, separando los núcleos atómicos en función de la relación entre su masa atómica y carga iónica (aniones o cationes). Puede utilizarse para identificar los diferentes elementos (e isótopos) químicos que forman un compuesto químico. Para medir las relaciones masa/carga de iones, se calienta una pequeña porción del compuesto a analizar hasta vaporizarlo e ionizar los diferentes átomos. Luego, los campos magnéticos o eléctricos transportan los iones al analizador. El haz de iones produce un patrón específico en el detector, que permite analizar el compuesto.



Figura 7. Espectrómetro de masa (LAICPMS) del Laboratorio de Geocronología de la Universidad de Brasilia, Brasil.

Las diferentes técnicas analíticas utilizan distintos tipos de haz de iones, lo que permite que el análisis sea más preciso, pero que, por esta razón, lleve más tiempo la obtención de un dato. Por ejemplo, las técnicas más usadas son TIMS, SIMS, ICPMS, entre otras. La primera por sus siglas en inglés *Thermal Ionization Mass Spectrometry* (TIMS, espectrometría de masa por ionización térmica), es la técnica con mejor precisión, pero la obtención del dato tarda entre 3-4 horas por cada circón analizado. En esta técnica se diluye el mineral para obtener un líquido químicamente puro, para luego ser calentado, evaporar el solvente y obtener un efecto iónico térmico.

La segunda técnica mencionada es la *Secondary Ion Mass Spectrometry* (SIMS, espectrometría de masa por ionización secundaria), con esta técnica se logran datos muy precisos y en tan solo ~30 minutos de análisis por circón. La técnica SIMS se basa en analizar la composición de superficies sólidas, a partir de la pulverización de la muestra con un haz de iones primarios, recolectando y analizando los iones secundarios expulsados.

La última técnica mencionada se llama *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (LAICPMS), ésta emplea un plasma acoplado inductivamente. Esta técnica utiliza energía proporcionada por corrientes eléctricas para ionizar la muestra, usando una ablación por láser, atomizando la muestra –el circón, en este caso- creando iones atómicos, para luego ser detectados. Actualmente, ésta es la técnica más utilizada, pues solo se tarda ~2 minutos en obtener el dato por circón (Figura 8).

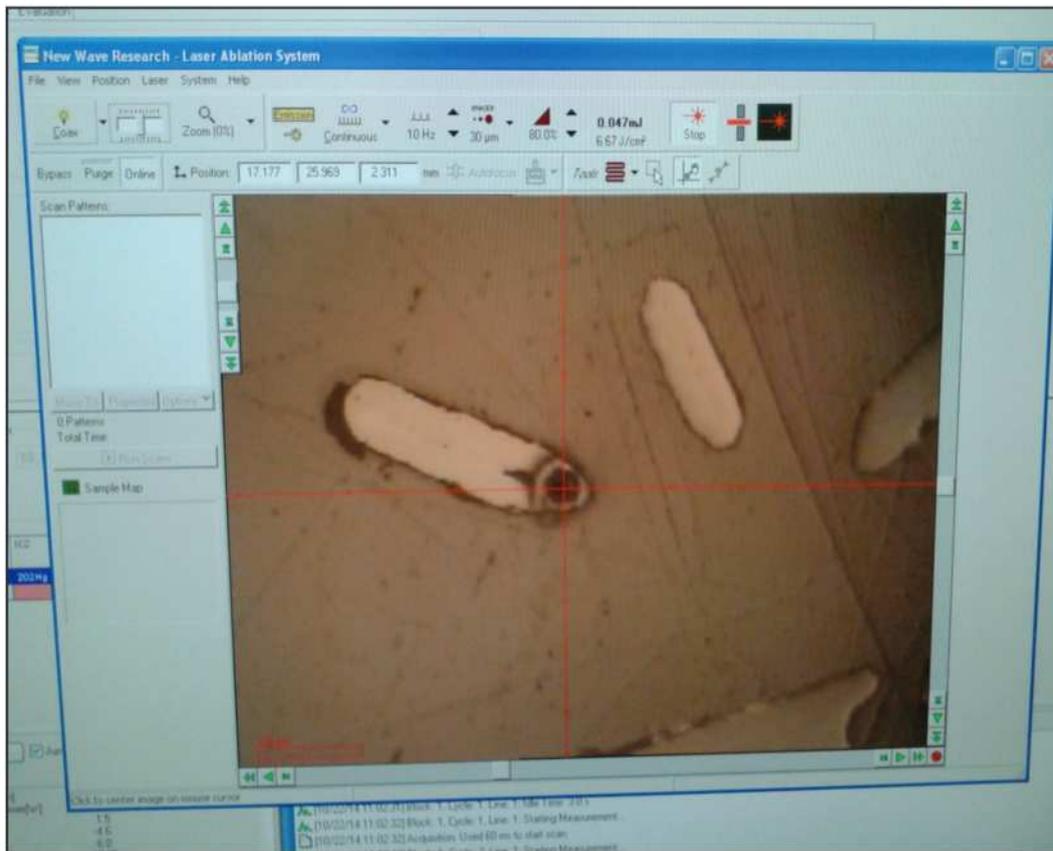


Figura 8. Fotografía donde se observa un cristal de circón siendo analizado en el espectrómetro de masa.

Luego de los análisis, los datos son procesados y corregidos (se eliminan errores de análisis y se corrobora la información) en distintos programas, y así se llega a los datos finales, listos para ser usados.

Grandes avances en el estudio de la evolución de la Tierra, a partir de los circones

Volviendo a la pregunta inicial ¿cómo se llega a determinar la edad de una roca que tiene aproximadamente 515 millones de años, a partir de un mineral microscópico? Podemos decir que, a partir del estudio, primero en el campo y después en gabinete bajo la observación en microscopio y el análisis de circones por el método U-Pb, se llega a obtener la edad de una de las rocas más antiguas que se encuentran en la Puna salteña.

En la Puna salteña, noroeste de Argentina, investigadores del IBIGEO, Universidad Nacional de Salta-CONICET (ver Ortiz et al. 2017, 2019), determinaron edades de unos ~515-520 millones de años en circones de rocas graníticas (rocas conformadas por minerales de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita y muscovita, muchas de las mesadas pulidas tan bonitas que se ven en algunas cocinas, son de rocas graníticas similares a esta) (Figura 5), a partir del método LAICPMS.

En estos trabajos, los autores no solo establecieron las edades de las rocas, sino también pudieron determinar las fuentes que le dieron origen a las rocas graníticas. Además de usar los isótopos de U-Pb, utilizaron isótopos de Lu-Hf para conocer el origen de las rocas graníticas. Con estos se comprobó que las fuentes que originaron las rocas graníticas estudiadas de la Puna salteña corresponden a una mezcla entre magmas (masas de rocas fundidas) de diferente composición que se formaron a distintas profundidades en el interior de la Tierra, algunos magmas procedieron del manto (a más de 40 km de profundidad) y otros magmas de la corteza terrestre (entre 30 y 10 km de profundidad).

Como se puede observar los circones tienen características muy peculiares y juegan un papel muy significativo en la geología. Gracias a éstos, en conjunto con el avance científico y tecnológico, han contribuido con grandes avances en el estudio de la evolución de la Tierra y los procesos que la formaron.

Cabe destacar, que en esta nota solo se mencionaron unos pocos métodos y usos de los circones en la geología, sin embargo, hay un rango muy amplio de técnicas y minerales que son usados en diversas ramas de la geología, la ya conocida geocronología, termocronología (ver [Arzadún, 2020. Temas B&GNOA, vol.10, n°3](#)), entre otros.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis amigos y compañera de vida, José "Pepe" González, Emilce Bustos y Silvia Juárez, respectivamente, quienes me brindaron excelentes comentarios para que la lectura de esta nota fuera más amena. Asimismo, agradecer al Comité Editorial de la revista, Silvana Geuna, Carolina Montero, y Natalia Zimicz, sus comentarios y sugerencias fueron muy valiosas y mejoraron sustancialmente el artículo final. También, quiero dedicar este artículo a mi abuelo y colega Gerardo, quien fue mi inspiración de pequeño para adentrarme en el maravilloso mundo de la geología. Mi abuelo recientemente partió de este mundo, pero siempre seguirá presente dentro de mi corazón, acompañándome en el lindo recorrido y estudio de la Tierra.

REFERENCIAS Y LITERATURA RECOMENDADA

ALLÈGRE CJ. 2008. Isotope Geology. Cambridge University Press. ISBN: 9780511809323.

ARZADÚN G. 2020. La edad de las rocas. Temas de Biología y Geología del NOA, 10 (3): 7-15.

DICKIN AP. 2005. Radiogenic Isotope Geology. Cambridge University Press. 2nd edition. ISBN: 9781139165150.

FAURE G. 2001. Origin of Igneous Rocks. The Isotopic Evidence. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-04474-2.

HAUSER N. 2021. La mayor estructura de impacto de América del Sur: el Domo de Araguainha (Brasil). *Temas de Biología y Geología del NOA*, 11 (1): 9-19.

ORTIZ A, N HAUSER, R BECCHIO, N SUZAÑO, A NIEVES, A SOLA, M PIMENTEL, W REIMOLD. 2017. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes for the Diablillos Intrusive Complex, Southern Puna, Argentina: crustal evolution of the Lower Paleozoic orogen, Southwestern Gondwana margin. *Journal of South American Earth Sciences*, 80: 316-339.

ORTIZ A, N SUZAÑO, N HAUSER, R BECCHIO, A NIEVES. 2019. New hints on the evolution of the Eastern Magmatic Belt, Puna Argentina. SW Gondwana margin: Zircon U-Pb ages and Hf isotopes in the Pachamama Igneous-Metamorphic Complex. *Journal of South American Earth Sciences*, 94: 102246.

WILDES A, JW VALLEY, WH PECK, CM GRAHAM. 2001. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 409(6817): 175-178.