



Química de la Luna: implicaciones sobre el origen y estructura del satélite natural de la Tierra

Vanessa González-Morales*, Fernando Velasco-Tapia*

*Un pedazo de Luna en el bolsillo
es mejor amuleto
que una pata de conejo.
La Luna, Jaime Sabines (1988)*

DOI: <https://doi.org/10.29105/cienciauanl25.107-2>

RESUMEN

Se presenta una breve revisión de las características químicas generales de la Luna, así como el análisis estadístico multivariado de una base de datos de basaltos lunares y las implicaciones de este ejercicio en el origen y la estructura del satélite natural.

Palabras clave: Luna, Geoquímica, acreción, evolución de magma, basalto, análisis multivariado.

El 20 de julio 2019 se cumplió el 50 aniversario del alunizaje de la misión norteamericana Apolo XI y de la primera vez que el ser humano visita un cuerpo extraterrestre. Posteriormente, misiones tripuladas (Apolo XII, XIV-XVII) y no tripuladas (Luna IX, XVI, XX y XXIV, Unión Soviética), entre 1969 y 1976, permitieron el acceso a material lunar superficial (~ 380 kg) y, además, obtener información sobre su estructura interna a través de estudios geofísicos (figura 1; Henderson, 1982).

Algunos de los rasgos generales que caracterizan a nuestro satélite natural incluyen (Henderson, 1982; Jolliff *et al.*, 2006): (a) radio= 1738 km; (b) volumen= 2.2×10^{10} km³; (c) masa= 7.35×10^{25} g; (d) densidad= 3.34 g/cm³; (e) gravedad en la superficie= 1.62 m/s²; (f) albedo= 0.07; (g) intervalo de temperatura= -173°C (mínimo nocturno) a 107°C (máximo

ABSTRACT

A brief review of the general chemical features of the Moon is presented, as well as the multivariate statistical analysis of a lunar basalt database, and the implications of this exercise in the natural satellite origin and structure.

Keywords: Moon, Geochemistry, accretion, magma evolution, basalt, multivariate analysis.

diurno); (h) estructura general= corteza con un espesor promedio de ~ 60 km en el lado visible (40-120 km), mientras que puede alcanzar los 150 km en el lado oscuro; un manto de ~ 1300 km de espesor y núcleo con ≤ 350 km de espesor. Cabe señalar que la Luna es un satélite inusualmente grande en comparación con su planeta. La superficie lunar se puede dividir en tres tipos de terrenos, los cuales son visibles desde la Tierra (Jolliff *et al.*, 2006): (a) mares (*Maria*): áreas oscuras de bajo relieve y con un muy bajo albedo, constituidas principalmente por basalto y regolito; (b) mesetas (*Upland*): zonas de relieve medio y con un mayor albedo, con una alta densidad de cráteres y constituidas por una mezcla de basalto, regolito y anortosita; y (c) montañas (*Highlands*): áreas claras de alto relieve (alcanzando ~ 3 km de desnivel respecto a los mares) y con un alto albedo, dominadas por rocas anortosíticas.

* Universidad Autónoma de Nuevo León.
Contacto: vanesagonzmor@gmail.com

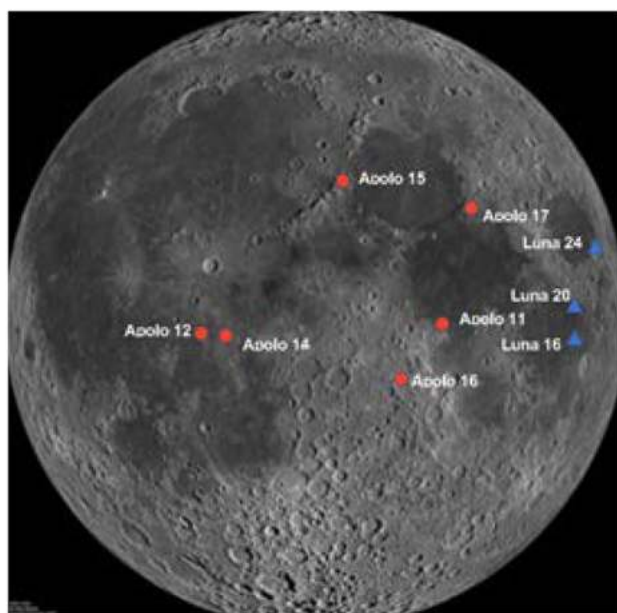


Figura 1. Ubicación de los sitios de alunizaje de las misiones en la cara visible, las cuales regresaron con material (basalto, anortosita y regolito). Los puntos rojos indican las misiones Apolo (EE UU) y los triángulos azules las misiones Luna (URSS) (Henderson, 1982).

El estudio de la Luna, desde el entendimiento de su ciclo de fases en la antigüedad, pasando por las observaciones de Galileo a partir de 1609 y durante la etapa de la exploración espacial, ha demostrado la importancia del satélite para entender el origen y la evolución de la Tierra. En el presente estudio se reportan los resultados iniciales de una revisión bibliográfica sobre la composición química general y de los basaltos expuestos en la superficie lunar, el análisis estadístico multivariado (agrupamiento) de estos datos y las implicaciones del ejercicio en el modelo más aceptado para explicar el origen y la estructura de la Luna. La hipótesis de la que se parte es la capacidad de la herramienta estadística para distinguir las variedades de basalto lunar, las cuales tienen un distinto origen.

METODOLOGÍA

En primera instancia, se consideró la composición global (con base en 10^6 átomos de Si) de Faure (1991). Ésta se comparó con lo observado en el patrón de abundancias cósmicas (representado por meteoritos condriticos; Anders y Ebihara, 1982) a fin de identificar cuantitativa y visualmente qué elementos se encuentran empobrecidos o enriquecidos en la Luna respecto a la composición inicial del Sistema Solar.

En el caso de las rocas lunares, la principal fuente de información fue la página Web *MoonDB* (NASA, 2019; www.moondb.org), la cual ha sido preparada y difundida por la NASA. Los datos de composición de elementos mayores (%)

y traza (ppm) fueron compilados en un archivo del programa *Statistica for Windows* (Statsoft, Inc.; Tulsa, OK) denominado *Moon.sta*. Para efectuar el ejercicio, se descartaron aquellas muestras que no presentaban completa la composición química en elementos mayores. Posteriormente, la información fue procesada a fin de generar una composición de elementos mayores ajustada a 100% en base seca.

Con el propósito de identificar los diferentes tipos de basalto y anortosita que se encuentran expuestos en la superficie lunar, se aplicó un análisis estadístico de agrupamiento (*Cluster analysis*; Bratchell, 1989). Éste es un procedimiento cuyo propósito es la distribución de observaciones en grupos o *clusters*, cuyos elementos mostrarían características similares y el mayor contraste posible con respecto a los elementos de los otros grupos. El análisis de agrupamiento jerárquico se efectuó a partir del logaritmo natural de las relaciones de elementos mayores respecto al titanio en condición ajustada ($\ln[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]$, $\ln[\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2]$, $\ln[\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2]$, $\ln[\text{FeO}/\text{TiO}_2]$, $\ln[\text{MnO}/\text{TiO}_2]$, $\ln[\text{MgO}/\text{TiO}_2]$, $\ln[\text{CaO}/\text{TiO}_2]$, $\ln[\text{Na}_2\text{O}/\text{TiO}_2]$, $\ln[\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2]$ y $\ln[\text{P}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2]$).

Es importante considerar que la composición de elementos mayores representa la base sobre la cual se constituye cada una de las rocas. Las relaciones fueron estandarizadas previamente por medio de la relación:

$$K_{ij} = \frac{X_{ij} - X}{s_{ic}} \quad (1)$$

en donde K_{ij} es el valor estandarizado de X_{ij} , la i -ésima variable para la j -ésima muestra, X es la media de la i -ésima variable y s_{ic} es la desviación estándar asociada. El procedimiento de discriminación siguió la regla de encadenamiento de Ward (Bratchell, 1989), que enlaza de forma iterativa puntos cercanos a través de una matriz de similaridad que evalúa la distancia entre los grupos. El procedimiento da igual peso a cada una de las relaciones geoquímicas. La medida de similaridad entre dos muestras (j, k) es la denominada distancia euclidiana y está dada por:

$$d_{jk} = \left[\sum_{i=1}^N (K_{ij} - K_{ik})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

donde K_{ij} representa la K -ésima variable medida sobre un objeto i de la muestra j y K_{ik} representa la K -ésima variable medida sobre un objeto i de la muestra k . Los resultados del análisis se representaron por medio de un dendograma en unidades de distancia euclidiana.

Una vez establecidos los grupos o *clusters* de basalto y anortosita se determinaron las características geoquímicas

cas que los distinguen. Como es usual en Geoquímica (por ejemplo, Rollinson, 1993), para visualizar las diferencias se prepararon diversos diagramas de variación binarios y ternarios con base en elementos, relaciones de elementos o normalizadas respecto a un patrón (por ejemplo, el patrón de abundancias cósmicas, condrita, etc.). En esta etapa se consideró, además, la composición de elementos traza, la cual fue visualizada a través de diagramas normalizados. Los grupos o *clusters* fueron comparados con las clasificaciones generales que se han propuesto de forma previa para rocas lunares. A partir de estos resultados se efectuó una breve discusión sobre la geoquímica lunar y sus implicaciones en el origen y la evolución del satélite. Cabe aclarar que, como ejemplo, en este documento sólo se discuten los resultados del análisis de agrupamiento de la base de datos de basaltos lunares.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La teoría más aceptada sobre el origen de la Luna se ha denominado como *Modelo del gran impacto* (Morbidelli *et al.*, 2012). Ésta contempla el choque de la protoTierra con un planetóide del tamaño de Marte (Theia), probablemente entre 30 y 70 millones de años después de la formación de la Tierra. El impacto resultó tan energético que fundió parte del planetóide Theia y, en una menor escala, la parte superficial de la protoTierra. Se ha sugerido que ~75% del material que constituye la Luna lo aportó Theia.

Sin embargo, relaciones isotópicas de elementos refractarios titanio ($^{50}\text{Ti}/^{47}\text{Ti}$) o tungsteno ($^{182}\text{W}/^{184}\text{W}$) comparables entre rocas lunares y el manto terrestre sugieren un aporte mucho mayor a la protoLuna por parte de la Tierra o modelos más complejos (Zhang *et al.*, 2012; Pahlevan, 2018). De esta forma, el satélite concentró principalmente elementos litófilos (que se asocian a silicio y oxígeno), pero con características refractarias (que resisten alta temperatura y tienen conductividades térmicas bajas). Estos incluyen Li, Al, Ca, Sc, Ti, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, lantánidos, Hf, Th y U (figura 2). En contraste, la Luna se encuentra empobrecida en elementos litófilos volátiles, siderófilos (asociados a hierro y que se concentran en el núcleo), calcófilos (asociados a azufre) y atmófilos (H, N y gases nobles) (figura 2). Los elementos refractarios tendrían una composición similar en la Tierra y la Luna, mientras que los volátiles estarían empobrecidos en la Luna (K, Rb y Cs un 75%; Tl y Cd un 99%) (Taylor y Wiczorek, 2014).

Los fragmentos de la colisión empezaron a chocar (acreción) en órbita terrestre para formar la Luna. Ya que la mayor parte del material lo constituían silicatos, con una baja conductividad térmica, la disipación de calor generado por la acreción fue limitada y la temperatura de la masa se elevó

lo suficiente como para fundirse (~1400°C). El material más denso se concentró en el núcleo, que se separó del *Océano de magma lunar* hace 4,600 a 3,900 millones de años (Sistema *PreNectariense*).

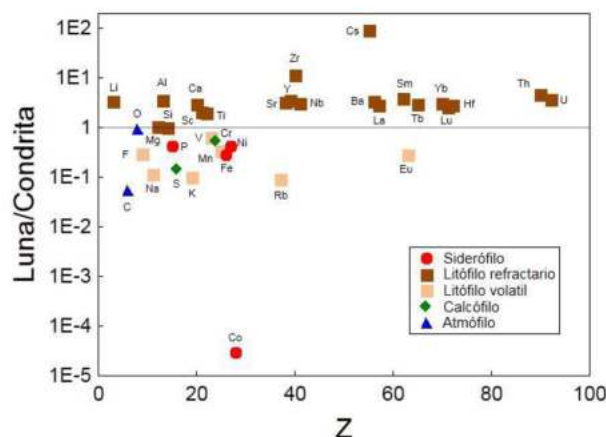


Figura 2. Diagrama de la composición de elementos en la Luna (Faure, 1991), normalizada a meteorito condritico (composición original del Sistema Solar; Anders y Ebihara, 1982) versus el número atómico (Z).

El escenario descrito ha sido capaz de explicar: (a) la baja densidad lunar (3.34 g/cm^3) respecto a la terrestre (5.52 g/cm^3) y (b) la geoquímica global lunar, dominada por elementos refractarios.

Por otra parte, la cristalización del océano de magma dio lugar a una diversidad de rocas lunares. En primera instancia, se formaron acumulaciones de olivino, piroxeno e ilmenita que conformaron el manto lunar, que sería después la fuente de los basaltos. Posteriormente tuvo lugar la cristalización de plagioclasa, que flotó a la superficie para formar la corteza lunar dominada por anortosita ferroana.

El líquido residual del proceso de cristalización dio lugar al denominado basalto KREEP (rico en potasio, tierras raras y fósforo). Éste es un grupo con una representatividad limitada, pero observado en todos los sitios explorados. Se identificó, además, un grupo de rocas de alto magnesio (dunita, norita, troctolita y gabronorita), con una mineralogía dominada por olivino±piroxenos±ilmenita observado principalmente en las mesetas. Se ha considerado que este grupo de alto Mg derivó de los KREEP (Shearer y Papike, 1999).

La fusión parcial del manto lunar dio lugar a la formación de basaltos de baja viscosidad (alta relación FeO/MgO) que constituyeron los mares. Estas lavas cubrieron ~17% de la superficie lunar, concentrándose principalmente en el lado visible, debido a que su corteza es más delgada. La mineralogía de los basaltos está dominada por olivino, piroxeno, mi-

nerales opacos y, en menor escala, plagioclasa. La actividad magmática ocurrió entre ~3900 y ~1500 millones de años (sistemas: *Nectariense*, 3900-3800 Ma-Gran bombardeo terminal; *Ímbrico*, 3800-3200 Ma y *Eratosteniense*, 3200-1500 Ma).

El ejercicio de análisis multivariado de agrupamiento que se ha aplicado en el presente estudio (figura 3) reveló la existencia de cuatro tipos de basalto lunar (A-D), cada uno subdividido en dos subgrupos.

La división estadística que se ha generado en este trabajo coincide aproximadamente con la clasificación previa de Neal y Taylor (1992), que se efectuó en función de los contenidos de titanio, magnesio y hierro. De esta forma, se identificaron grupos generales de basalto lunar de muy bajo (grupo C1), bajo (grupos A1, A2, B1, B2 y C2), intermedio (algunos ejemplares de grupo B1 y D2) y alto TiO_2 (grupos C1 y C2), los cuales se comparan con el basalto KREEP (figura 4).

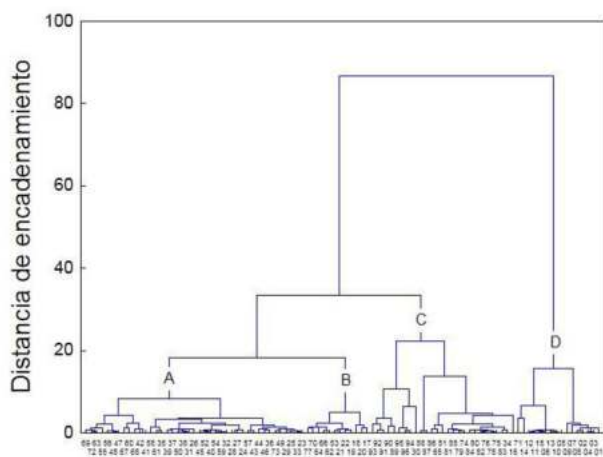


Figura 3. Dendrograma que muestra el resultado del análisis de agrupación por encadenamiento de distancias euclidianas para basaltos lunares (n = 98; fuente: www.moondb.org).

El origen de las diferentes variedades de basalto ha sido tema de debate. Sin embargo, algunas ideas se han aceptado de forma general (Jolliff *et al.*, 2006): (a) los procesos de fusión parcial del manto estuvieron relacionados con la dinámica interna lunar, más que con un efecto de los impactos meteoríticos; (b) los basaltos con concentraciones bajas de elementos traza podrían representar líquidos primitivos derivados de un manto lunar heterogéneo a ~200 km de profundidad; (c) los basaltos con mayor concentración de elementos traza podrían representar líquidos producto de procesos de cristalización a diversas escalas y profundidades <120 km desde los basaltos primitivos y (d) los diferentes tipos de basalto se generaron de forma contemporánea, aunque la mayor parte de los primitivos se generarían inicialmente.

De forma general, se ha interpretado (por ejemplo, Shearer y Papike, 1999) que los basaltos de alto TiO_2 (grupos D1 y D2; figura 4) se derivarían de los cumulos de alto-MgO con ilmenita. Los basaltos de muy bajo- TiO_2 (grupo C1) se habrían formado por fusión parcial de cumulos de alto-MgO dominados por olivino y ortopiroxeno. Se ha especulado que los basaltos de composiciones intermedias (grupos A1, A2, B1, B2 y C2) podrían ser el resultado de cristalización fraccionada desde líquidos tipo C1 o de asimilación de líquidos D1/D2 por parte de un líquido C1. El esquema se complementa con el denominado basalto KREEP, que se ha interpretado como un líquido residual de la cristalización de la anortosita hace ~3.9 Ga.

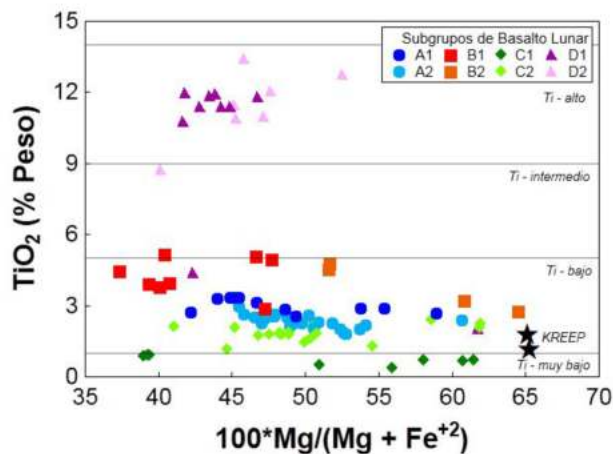


Figura 4. Diagrama de variación TiO_2 (% peso)-Mg# (= $100 * Mg / [Mg + Fe^{2+}]$, atómico) para basaltos lunares (modificado de Neal y Taylor, 1992), que incluye el basalto KREEP.

CONCLUSIONES

La interpretación geoquímica y estadística de la composición general de la Luna y de los basaltos lunares es información de utilidad para entender el origen y la evolución geológica del satélite, una historia íntimamente ligada a la de la Tierra. Al igual que los planetas terrestres, la Luna es producto de un proceso de acreción y de diferenciación magmática a través de fusión parcial y cristalización fraccionada. El análisis multivariado ha permitido identificar con claridad los diferentes tipos de basaltos lunares.

REFERENCIAS

- Anders, E., Ebihara, M. (1982). Solar-System abundances of the elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 46: 2363-2380.
- Bratchell, N. (1989). Cluster analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 6: 105-125.
- Faure, G. (1991). *Principles and Applications of Inorganic Geochemistry*. McMillan Publishing Company, 626 p.
- Henderson, P. (1982). *Inorganic Geochemistry*. Pergamon Press, 353 p.
- Jolliff, B.L., Wieczorek, M.A., Shearer, C.K., *et al.* (2006). New views of the Moon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 60:720 p.
- Morbidelli, A., Lunine, J., O'Brien, D., *et al.* (2012). Building terrestrial planets. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*. 40:251-275.
- NASA. (2019). *MoonDB: Advancing Access & Re-use of Lunar Sample Data*. Disponible en: www.moondb.org.
- Neal, C.R., y Taylor, L.A. (1992). Petrogenesis of mare basalts: a record of lunar volcanism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 56:2177-2211.
- Pahlevan, K. (2018). Telltale tungsten and the Moon. *Nature Geoscience*. 11:16-18.
- Rollinson, H.R. (1993). *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman, 352 p.
- Shearer, C.K., y Papike, J.J. (1999). Magmatic evolution of the Moon. *American Mineralogist*. 84:1469-1494.
- Taylor, G.J., y Wieczorek, M.A. (2014). Lunar bulk chemical composition: a post-Gravity recovery and interior laboratory reassessment. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 372:20130242.
- Zhang, J., Dauphas, N., Davis, A.M., *et al.* (2012). The proto-Earth as a significant source of lunar material. *Nature Geoscience*. 5:251-255.