

Caracterización multianalítica de basaltos de Lanzarote como simulante regolítico y recurso de habitabilidad lunar

Multianalytical characterization of Lanzarote basalts as a regolith simulant and lunar habitability resource

Fernando Alberquilla^{1,2}, Jesús Martínez-Frías², Rosario Lunar¹ y Valentín García-Baonza^{1,2}

¹ Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC-UCM). C/ Dr. Severo Ochoa, 7, 28040. Madrid.

falber01@ucm.es, lunar@geo.ucm-csic.es, vgbaonza@quim.ucm.es

² Departamento de Química Física, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España

falber01@ucm.es, j.m.frias@igeo.ucm-csic.es, vgbaonza@quim.ucm.es

ABSTRACT

The search for Terrestrial Analogues is essential for the development of future permanent or semi-permanent lunar bases. Terrestrial Analogues are zones where it is possible to probe not only scientific instruments but also to other astronaut capabilities in an environment that is similar to the geological context, geomorphology, mineralogical, geochemistry, etc that we can find on Mars, the Moon and even asteroids. This work has focused on a multi-analytical characterization of three Lanzarote regions (Maciot, Tao y Lavas de Timanfaya), with different geochemical and petrophysical test. These results have been compared with data provided by other authors on samples brought from the Apollo missions. This has allowed to determine the analogy between the study regions and the Apollo 14 moon landing site known as Fra-Mauro formation. In addition, it is concluded which resources are potentially extractable from the Moon regolith and its function in a future semipermanent lunar base. Finally, it is proposed the possibility of developing the first Spanish lunar soil simulant through one of the Lanzarote basalts.

Key-words: Basalts, Lanzarote, Habitability, Regolith Simulant, Terrestrial Analogues.

RESUMEN

La búsqueda de análogos terrestres es crucial para el desarrollo de futuras bases lunares permanentes o semipermanentes. Los análogos terrestres son regiones donde es posible probar no solo instrumental científico, sino también las capacidades de los astronautas en un entorno que, por su contexto geológico, geomorfológico, mineralógico, geoquímico, etc es similar al que podemos encontrar en Marte, la Luna e incluso asteroides. Este trabajo se ha centrado en la realización de una caracterización multianalítica de tres regiones de Lanzarote (Maciot, Tao y Lavas de Timanfaya) a través del empleo de diferentes técnicas geoquímicas y petrofísicas. Los resultados han sido comparados con los datos aportados por otros autores sobre muestras traídas de las misiones Apolo. Esto ha permitido determinar la analogía existente entre las regiones de estudio y la región de alunizaje del Apolo 14 conocida como Fra-Mauro. Además, se ha podido concluir qué recursos son potencialmente extraíbles del regolito lunar y su función en una futura base semipermanente. Por último, se propone la posibilidad de elaborar el primer simulante regolítico lunar usando basalto de Lanzarote.

Palabras clave: Basaltos, Lanzarote, Habitabilidad, Simulante regolítico, análogos terrestres.

Geogaceta, 72 (2022), 51-54
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 08/10/2021
Fecha de revisión: 22/04/2022
Fecha de aceptación: 27/05/2022

Introducción

Nos encontramos en una nueva carrera espacial en la que seremos testigos de la llegada de la humanidad a Marte convirtiéndonos en una especie interplanetaria. Sin embargo, para el establecimiento de futuras bases permanentes o semipermanentes en otros planetas o lunas será crucial superar los retos que supone la habitabilidad en nuestro propio satélite. Siendo la Luna un entorno tremendamente hostil, los análogos terrestres son laboratorios naturales donde probar instrumental científico y desarrollar ideas vanguardistas, que conduzcan al éxito de las futuras misiones espaciales (Martínez-Frías et al. 2016). Las Islas Canarias junto con Río Tinto o el sistema eva-

porítico-hidrotermal de Jaroso-Sorbas-Cabo de Gata son una puerta de entrada a estos entornos extraterrestres en España. Concretamente, el archipiélago canario comprende una larga serie de erupciones volcánicas históricas que han modelado su orografía y, en su geodiversidad, abarcan una gran variedad de rocas volcánicas y plutónicas (Martínez Frías et al., 2016) que, han podido contextualizarse como análogos lunares y planetarios (Martínez Frías, 2020).

Así pues, esta investigación pretende determinar qué región de la isla de Lanzarote es más favorable como área fuente para el desarrollo del primer simulante regolítico español para estudios en la Luna y Marte sobre geología planetaria y astrobiología.

Material y Métodos

En esta investigación se seleccionaron tres zonas de Lanzarote para su estudio y posterior caracterización. Primeramente, la zona de lavas de Timanfaya, uno de los geositos clave del Geoparque Mundial de la UNESCO "Lanzarote y Archipiélago Chinijo" (Lanzarote and Chinijo islands, 2014) y es considerado el campo de lava más grande del mundo (Martínez and Mariñoso, 2020). Seguidamente, la zona de Maciot se sitúa en el extremo sur de la alineación de Femés y las peñas de Tao, situada en el centro insular (Alberquilla, 2021a).

En la campaña de muestreo se recogieron 37 rocas basálticas, seleccionando las 19 más frescas para su caracterización. En el Centro de Apoyo a la Investigación

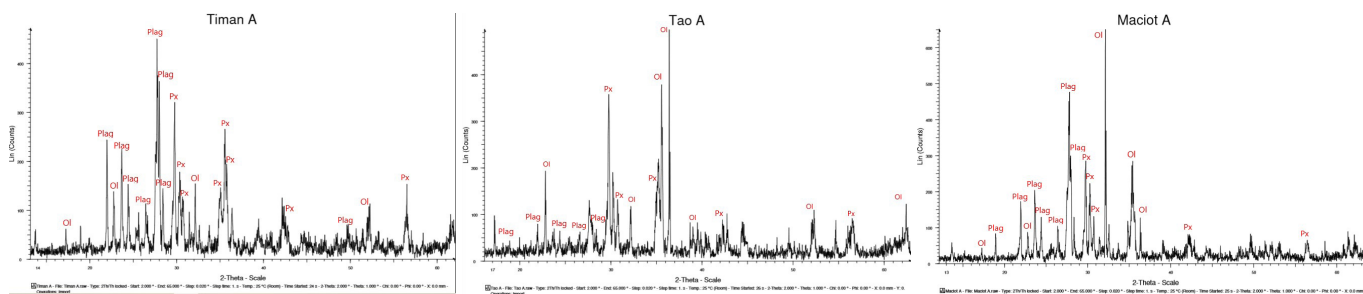


Fig. 1.- Resultados de DRX en las muestras de Tao A, Timanfaya A y Maciot A, (Alberquilla, 2021b).
 Fig. 1.- XRD in Tao A, Timanfaya A and Maciot A samples (Alberquilla, 2021b).

(CAI), y en el Centro Nacional de Microscopía Electrónica (ICTS), se realizó un estudio mineralógico, geoquímico y textural a través del análisis por microscopía de luz reflejada, EPMA, DRX, FRX, Espectroscopía Raman, SEM-EDX e ICP-MS. En paralelo a estas, en el laboratorio de petrofísica del Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), se llevó a cabo una determinación de las propiedades petrofísicas a través de los ensayos de color, dureza, rugosidad, velocidad de ultrasonidos, saturación, porosimetría de mercurio y estimación de la resistencia a compresión simple.

Resultados y discusión

Las observaciones por microscopía óptica de luz transmitida y reflejada han aportado la información petrográfica y textural de las rocas, presentando todas ellas un carácter fuertemente vesicular, con tamaños vesiculares muy variables desde 2,5cm a <150µm. Otras texturas que pueden identificarse son la textura vítrea, afanítica e intergranular subofítica. Mineralógicamente se han podido identificar tres grupos minerales; el grupo del olivino, los clino y orto piroxenos, las plagioclasas y los minerales opacos.

Análisis químicos y mineralógicos

Los resultados de la difracción de rayos X se muestran en la figura 1. Esta técnica corrobora los grupos minerales identificados en la microscopía óptica y además refleja sus distintas abundancias relativas en cada una de las muestras analizadas.

Al comparar estos resultados con los datos de difracción de rayos X aportados por Taylor et al. (2019), puede observarse que los basaltos de Tao y Maciot se asemejan a la composición mineralógica de los basaltos del Apolo 14 y Apolo 17.

En paralelo a estas determinaciones

se realizaron las técnicas de FRX, Raman, SEM-EDX, EPMA e ICP-MS. Los resultados de FRX se muestran en la Tabla I. Estos datos se compararon con tres simulantes regolíticos lunares; CAS-1, JSC-1 y MKS-1 (Zheng et al., 2009) y con muestras analizadas del Apolo 14 (Rodríguez-Lozada et al., 2010). Geoquímicamente, las muestras de las tres zonas lanzaroteñas han presentado similitudes respecto a la geoquímica de la superficie lunar y sus simulantes.

Evidentemente, hay regiones lunares más afines que otras. El contenido en óxidos mayoritarios en los basaltos de Lanzarote muestra resultados afines con los datos aportados por Papike (2018) para muestras de rocas de mares basálticos de las misiones Apolo. No obstante, no todos los mares lunares son iguales en composición, y por ello pueden clasificarse según %TiO₂, %Al₂O₃ y K (ppm) para determinar el sitio de alunizaje con mayores similitudes a las muestras analizadas (Neal y Taylor, 1992). En este caso los datos obtenidos apuntan que el mar basáltico más próximo a las composiciones de los basaltos de Lanzarote es el del lugar de aterrizaje del Apolo 14, también conocida como región de Fra-Mauro.

Los medidas realizadas con SEM-EDX, Espectroscopía Raman y Microsonda Electrónica han permitido realizar una caracterización química y mineralógica de gran detalle en las tres zonas muestreadas.

Los datos de microscopía electrónica de barrido con energía dispersiva de rayos X permitieron identificar los minerales opacos como ilmenitas y cromitas, además del resto de especies minerales como la forsterita, bytownitas, augitas y diópsidos. Esto concuerda con los análisis de muestras basálticas lunares en los que se ha definido que en la mayor parte de los mares basálticos contienen alrededor de un 80% Forsterita ((Mg_{1.65}Fe_{0.37})SiO₄) frente a un 20% Fayalita..

Posteriormente, comparando los %TiO₂ de las muestras de Lanzarote con muestras de mares lunares según Giguere et al., (2000) se puede observar que las muestras de Lanzarote se encuadran dentro de valores bajos en %TiO₂. Considerando la utilización de TiO₂ como recurso de habitabilidad, sería conveniente seleccionar regiones con un mayor porcentaje en peso como la del Apolo 17 en la que se reportaron muestras con contenidos en TiO₂ de entre 8-14% en peso (Warner et al., 1979).

El aprovechamiento del TiO₂ en la superficie lunar tiene como objetivo la extracción de oxígeno. Existen dos ideas principales para su obtención del regolito. La primera consiste en la reducción de la ilmenita (Gibson y Knudsen 1985) y la segunda en el cultivo de plantas que son productoras en sí mismo de oxígeno (Caruso et al., 2008). De hecho, estos autores proponen la combinación de ambas propuestas para la obtención de oxígeno siendo necesario un total de 2000kg de oxígeno anuales para satisfac-

Muestra	Timan	Tao	Maciot
SiO2			
(wt%)	48.42	45.57	45.55
TiO2	2.38	2.67	3.40
Al2O3	14.73	12.28	14.49
MnO	0.15	0.19	0.15
MgO	8.16	8.18	7.24
CaO	9.14	10.59	9.38
Fe2O3	11.99	14.62	12.44
FeO	0.00	0.00	0.00
Na2O	3.14	2.88	3.53
K2O	0.58	0.65	0.69
P2O5	0.38	1.99	0.81

Tabla I.- Resultados de FRX (Alberquilla, 2021b).

Table I.- XRF data (Alberquilla, 2021b).

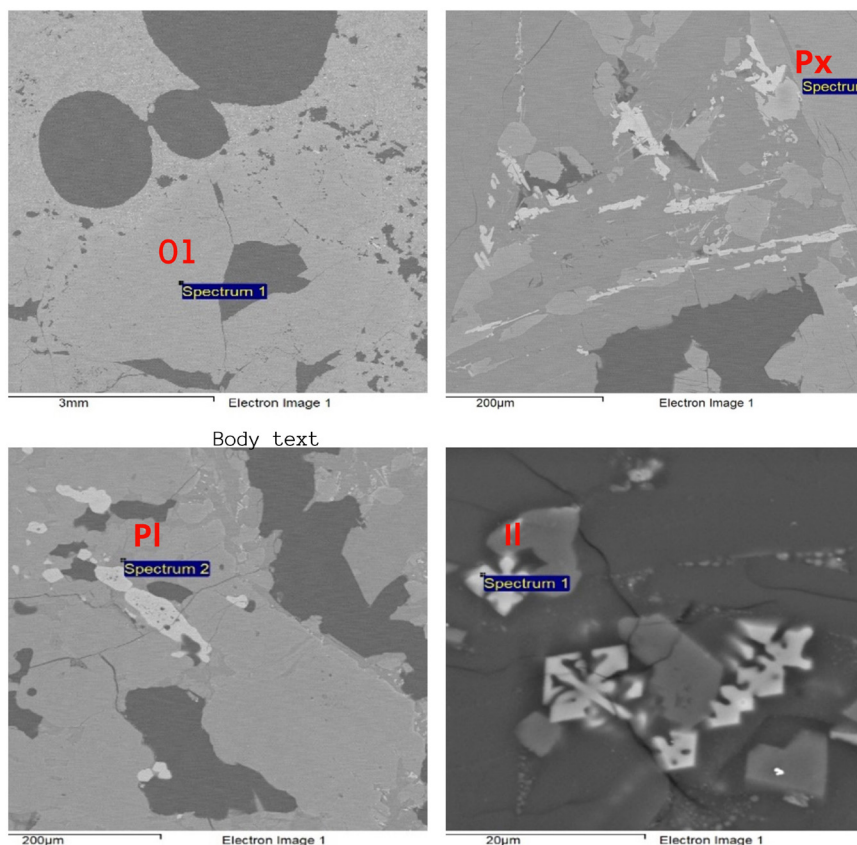


Fig. 2.- Resultados de SEM-EDX en los cuatro grupos minerales principales (Alberquilla, 2021b).

Fig. 2.- SEM-EDX data in the four main mineral groups (Alberquilla, 2021b).

er las necesidades de una arquitectura lunar, la mitad se obtendría por medio de la reducción de la ilmenita y la otra mitad por medio del cultivo de plantas. En este sentido, regiones con elevadas concentraciones de ilmenita en la superficie lunar favorecerían el desarrollo de la primera idea. En contraposición, regiones con bajas concentraciones de metales pesados (Titanio) como la región

de Fra-Mauro, o los basaltos de las tres regiones lanzaroteñas, serían más favorables para la producción de oxígeno a través del cultivo de plantas.

Los datos de la Microsonda electrónica han permitido obtener la química mineral, revelando un estado de oxidación continua en cromitas ((Fe²⁺_{0.6}Mg_{0.5})_{0.4}(CrFe³⁺_{0.4}Al_{0.5}Ti_{0.1})O₄) e ilmenitas (Fe²⁺_{0.44}Ti_{0.51}Fe³⁺_{0.97}O₃).

Los resultados de ICP-MS (Tabla II) para REE, fueron comparados con el simulante regolítico lunar CAS-1 aportados por Zheng et al., (2009), muestras de suelo y de rocas basálticas del volcán de la Corona en Lanzarote (Muhs et al., 2010) y cinco grupos de muestras de rocas de mares lunares de la misión Apollo 14 (Dickinson et al., 1985). Todos ellos normalizados al condrito según Evensen et al., (1978). Es evidente que las acumulaciones en LREE (La, Ce, Nd, Sm) son superiores a las HREE (Eu, Gd, Tb, Dy) pero no son lo suficientemente elevadas como para considerar su exploración. No obstante, existe una analogía significativa en la abundancia relativa de estos elementos entre las muestras comparadas. Si el objetivo fuera explotar estos recursos en la superficie lunar se han medido valores

REE (ppm)	Timan	Tao	Maciot
La	73,59	220,77	69,50
Ce	64,27	180,28	70,54
Nd	44,32	101,31	54,88
Sm	33,12	54,55	40,26
Eu	29,30	44,81	36,19
Gd	24,47	39,16	28,88
Tb	18,69	26,17	20,83
Dy	14,95	20,07	16,53

Tabla II.- Resultados de ICP-MS (Alberquilla, 2021b) normalizados al condrito según Evensen et al., 1978.

Table II.- ICP-MS data normalized to the chondrite according to Evensen et al. 1978.

más altos (≈10⁵ ppm) en los denominados terrenos KREEP (Lindstrom et al., 1985)

Resultados de los ensayos petrofísicos

Con el objetivo de evaluar las posibles alteraciones en las muestras se determinaron primeramente los parámetros de Color y Rugosidad. Los valores obtenidos de cada ensayo para cada una de las tres regiones fueron comparados con los del modelo de basalto lunar definido por Rodríguez Losada et al., (2010) y un basalto lunar de la región Fra-Mauro (Apollo 14) definido por Kiefer et al., (2012).

Los resultados del ensayo de color se encuadran dentro de valores de Luminosidad (L*) intermedios-bajos (32-46%) siendo 100% blanco puro, y con índices de color; a* (amarillo-azul) y b* (verde-rojo) muy bajos. Estos resultados nos permitieron descartar algunas muestras que presentaban un grado de alteración superior al recomendado por la presencia de óxidos y carbonatos. En la Luna la inexistencia de atmósfera imposibilita la alteración de las rocas por lo tanto las muestras analizadas en este trabajo debían ser lo más frescas posible. Los mapas 3D del ensayo de rugosidad por su parte no mostraron ningún tipo de alteración superficial de las muestras (Alberquilla, 2021b). Los valores de dureza fueron muy diversos, pero generalmente han sido las muestras de Timanfaya las más duras con valores >850 (adimensionales), seguidas de las muestras de la cantera de Maciot (>500) y por último las muestras de Tao (300-500). El ensayo de ultrasonidos reveló la anisotropía global de la roca siendo las muestras de Tao las más isotropas registrando las mayores velocidades de ondas P (>5000m/s). La densidad (≈2,9 g/cm³) y porosidad global (3-21%) de los basaltos se obtuvo mediante los ensayos de saturación y porosimetría de mercurio. Las muestras de la cantera de Maciot fueron las que registraron mayores densidades (3,1g/cm³) y las más porosas (13-21%). Por último, para realizar la estimación de resistencia a compresión simple (RCS) se utilizó la ecuación definida por Yilmaz y Goktan (2019) aplicando los valores de dureza obtenidos con el EQUOTIP3 y se compararon con los resultado de RCS obtenidos por Rodríguez-Losada et al., (2010). Los valores obtenidos para esta investigación se situaron entre 4-70Mpa, existiendo una afinidad con los basaltos escoriáceos (Alberquilla, 2021b).

Conclusiones

El uso del regolito y las rocas basálticas lunares constituyen recursos esenciales para la habitabilidad y el establecimiento de futuras bases semipermanentes.

Se establece la necesidad de llevar a cabo una caracterización multianalítica coordinada de las propiedades de los basaltos ya que proporciona un conocimiento global sobre los materiales que se van a utilizar como recursos.

Entre los recursos que pueden extraerse de las tres regiones de Lanzarote se encuentran el oxígeno, el hierro (11-16 %peso), el titanio (2-3.5 %peso) y el cromo (0.03-0.07 %peso) obtenidos sobre todo de la cromita e ilmenita. Estos metales son muy interesantes desde el punto de vista extractivo ya que aportarían resistencia a la corrosión (cromo) y protección frente a la radiación (titanio) en la superficie lunar.

Las proporciones de REE no son muy elevadas (0.0015-0.02 %peso), aunque existen regiones en la Luna que podrían ser de interés en este sentido como han demostrado otros autores (Lindstrom et al. 1985).

Los resultados petrofísicos permiten evaluar positivamente su viabilidad como recurso industrial y material de construcción, ayudando además a establecer modelos geotécnicos para apoyar la selección de aquellos materiales que reúnan las mejores condiciones de acuerdo con su utilización. Se establece así una analogía entre los basaltos de Lanzarote y la región lunar de Fra-Mauro (Apolo 14), siendo los basaltos de la cantera de Tao los que han presentado una mayor afinidad a nivel geoquímico y, por tanto, se propone a este geosítio como área fuente para la fabricación del primer simulante regolítico lunar español.

Contribución de los autores

Fernando Alberquilla Martínez: Adquisición de datos, edición, figuras, investigación y análisis.

Jesús Martínez Frías: Estructura del

trabajo, metodología Edición, investigación y análisis, revisión del manuscrito, coordinación y supervisión.

Rosario Lunar Hernández: Análisis, Coordinación y supervisión.

Valentín García Baonza: Análisis, Coordinación y supervisión.

Agradecimientos y financiación

Los autores agradecen al Dr. Lopo Vasconcelos y al Dr. Aitor Cambeses la revisión de este manuscrito.

La presente investigación no ha recibido ayudas específicas.

Referencias

- Alberquilla, F. (2021a). International Journal of Earth Sciences, 111, 589-590. <https://doi.org/10.1007/s00531-021-021>
- Alberquilla, F. (2021b). Multianalytical characterization of Lanzarote basalts as a prototype of lunar habitability resource, Hydrocarbon Exploration and Mineral Resources thesis, Complutense University of Madrid (UCM), 51 p.
- Caruso, J., Spina, D., Greer, L., John, W., y Michele, C. (2008, January). In 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (p. 808).
- Dickinson, T., Taylor, G. J., Keil, K., Schmitt, R. A., Hughes, S. S., y Smith, M. R. (1985). Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 90(S02), C365-C374.
- Evensen, N. M., Hamilton, P. J., y O'niions, R. K. (1978). Geochimica et cosmochimica Acta, 42(8), 1199-1212.
- Gibson, M. A., y Knudsen, C. W. (1985). In Lunar bases and space activities of the 21st century (p. 543).
- Giguere, T. A., Taylor, G. J., HAWKE, B. R., y Lucey, P. G. (2000). Meteoritics & Planetary Science, 35(1), 193-200.
- Kiefer, W. S., Macke, R. J., Britt, D. T., Irving, A. J., y Consolmagno, G. J. (2012). The density and porosity of lunar rocks. Geophysical Research Letters, 39(7).
- Lanzarote and Chinijo Islands Geopark (2014) <https://www.geoparque Lanzarote.org/geositios/>. Accessed 26 July 2020
- Lindstrom, M. M., Crozaz, G., y Zinner, E. (1985, March). In Lunar and Planetary Science Conference (Vol. 16, pp. 493-494).
- Martínez Frías, J., Mateo Mederos, M., y Lunar Hernández, R. (2016). Geotemas, 16(2), 343.
- Martínez Frías, J. (2020). Canarias: Una plataforma geológica y astrobiológica mundial para la Luna y Marte. *Investigación y Ciencia*. <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/astrologia/71/posts/canarias-una-plataforma-geologica-y-astrobiologica-mundial-para-la-luna-y-marte-18809> (28, nov., 2022).
- Martínez J. E, y Mariño P.E. (2020). International Journal of Earth Sciences, 109(8), 2697-2698.
- Muhs, D. R., Budahn, J., Skipp, G., Prospero, J. M., Patterson, D., y Bettis III, E. A. (2010). G Terra Nova, 22(6), 399-410.
- Neal, C. R., y Taylor, L. A. (1992). Geochimica et Cosmochimica Acta, 56(6), 2177-2211.
- Papike, J. J. (Ed.). (2018). Planetary materials (Vol. 36). Walter de Gruyter GmbH y Co KG. Chapter 5 (5-161).
- Rodríguez-Losada, J. A., Hernández-Fernández, S., Martínez-Frías, J., Hernández, L. E., y Lunar Hernández, R. (2010, May). In ISRM International Workshop on Rock Mechanics and Geoengineering in Volcanic Environments. OnePetro.
- Taylor, G. J., Martel, L. M., Lucey, P. G., Gillis-Davis, J. J., Blake, D. F., y Sarrazin, P. (2019). Modal analyses of lunar soils by quantitative X-ray diffraction analysis. Geochimica et Cosmochimica Acta, 266, 17-28.
- Warner, R. D., Taylor, G. J., Conrad, G. H., Northrop, H. R., Barker, S., Keil, K., ... y Schmitt, R. (1979). Apollo 17 high-Ti mare basalts-New bulk compositional data, magma types, and petrogenesis. In Lunar and Planetary Science Conference Proceedings (Vol. 10, pp. 225-247).
- Yilmaz, N. G., y Goktan, R. M. (2019). Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78(6), 4493-4503.
- Zheng, Y., Wang, S., Ouyang, Z., Zou, Y., Liu, J., Li, C., ... y Feng, J. (2009). CAS-1 lunar soil simulant. Advances in Space Research, 43(3), 448-454.