

Clasificación de unidades geológicas sobre la superficie lunar

Iñaki Ordóñez Etxeberria y Aitor Bastarrika Izagirre

*Departamento de Ingeniería Minera, Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.
Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz. Universidad del País Vasco UPV/EHU.*

Resumen

Este trabajo consiste en la aplicación de técnicas de teledetección sobre imágenes lunares, con el objetivo de obtener información de las características superficiales mineralógicas de la Luna. Se describen el tratamiento de las imágenes obtenidas por la misión SELENE, desarrollada por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), así como los resultados obtenidos para el área de estudio. La zona escogida se ubica en la región sur de la meseta Aristarchus, y corresponde a una de las regiones de mayor diversidad geológica de la Luna. Las 120 imágenes analizadas cubren alrededor de 10.000 km² y como resultado final del trabajo se ha realizado la cartografía mineralógica de la región a la mejor escala cartográfica conseguida hasta ahora.

Palabras clave: Luna, meseta y cráter Aristarchus, SELENE, MI-VIS, MI-NIR, LROC, cartografía lunar, geología lunar, mineralogía lunar.

Abstract

This work consisted in the application of remote sensing techniques on lunar images with the aim of obtaining information on the superficial mineralogy features of the moon. It describes the processing of the images obtained by the SELENE mission, developed by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), and the results obtained in one particular study area. The chosen region is located to the south of the Aristarchus plateau and corresponds to a region with one the biggest geological diversity in the moon. The 120 images analyzed cover an extension of 10,000 km², resulting in the best resolution mineralogy cartography obtained so far.

Key words: Moon, Aristarchus plateau and crater, SELENE, MI-VIS, MI-NIR, LROC, lunar cartography, lunar geology, lunar mineralogy.

Introducción

Si bien habitualmente las técnicas de teledetección se aplican sobre datos provenientes de la superficie terrestre, en este artículo se propone la aplicación de esas mismas técnicas sobre información de la superficie lunar valiéndonos de las imágenes de algunos de los satélites que orbitan alrededor de la Luna.

No es de extrañar que las agencias espaciales entiendan la teledetección como una disciplina preferente en sus investigaciones, y es-

tén utilizando estas técnicas para ampliar sus conocimientos de los diferentes cuerpos del sistema solar. Se envían sondas y se procesa información no sólo de la Luna, sino de las superficies y atmósferas de Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno entre otros cuerpos celestes (Clark *et al.*, 2003, y Nittler *et al.*, 2004).

Incluso recientemente se está empezando a valorar la espectrometría como una técnica a tener en cuenta en el estudio de planetas extrasolares, evaluando el espectro de luz de és-

* Autor para la correspondencia: iordonez002@ikasle.ehu.es; aitor.bastarrika@ehu.es

Recibido: 30-10-12; Aceptado: 10-05-13.

Tabla 1. Principales misiones lunares con interés geológico

Sensor	Región espectral	Rango (nm)	Resolución (m/px)
Clementine - Agencia: Nasa (1994-1994)			
UVVIS	Ultravioleta-Visible	400-1000	100-325
HiRes	Visible	400-800	7-20
LIDAR	Láser	—	40
LWIR	Infrarrojo	8000-9500	55-136
NIR	Infrarrojo Cercano	1100-2780	150-500
Smart-1 - Agencia: ESA (2003-2006)			
AMIE	Visible-Infrarrojo	750-950	50
SIR	Infrarrojo	900-2400	300
SELENE - Agencia: JAXA (2007-2009)			
MI	Visible-Infrarrojo	415-1550	20-62
SP	Visible-Infrarrojo	500-2600	500
TC	Visible	430-850	10
LRS	Radar	—	30
LALT	Láser	—	1600
Chandrayaan-1 - Agencia: ISRO (2008-2009)			
Moon Mineralogy Mapper-M3	Visible-Infrarrojo	446-3000	140
LRO - Agencia: NASA (2009-2012)			
Diviner	Infrarrojo	350-4000	180
LAMP	Ultravioleta	57,5-196,5	100
LOLA	Láser	—	5
LROC	Ultravioleta-Visible	300-680	1

tos y comparándolo con el reflejado por nuestro planeta sobre la superficie lunar (Pallé *et al.*, 2009).

Los criterios para clasificar y determinar unidades geológicas sobre la superficie lunar han variado significativamente en los últimos años. En los años 60 y 70 del siglo XX las pautas básicas usadas para definir la distribución espacial de los materiales geológicos de nuestro astro más cercano, eran definidas por la textura superficial y topográfica aportada por imágenes pancromáticas (Wilhelms *et al.*, 1979). El criterio de clasificación venía determinado básicamente por la tonalidad de las áreas, sin aportar información significativa sobre la mineralogía que las configuraba.

Sin embargo, los recientes avances en la teledetección han permitido expandir las posibilidades de este ámbito de estudio, la resolución y cobertura espacial han ido aumentando, y las misiones lunares han aportado imágenes multispectrales e hiperespectrales de gran calidad de la superficie lunar (Jaumann *et al.*, 2012).

Las características y localización de materiales lunares están siendo objeto de estudio por diversas Agencias Espaciales y equipos de investigación. En este sentido, el número de misiones y satélites enviados a la Luna desde mediados del siglo pasado es elevado, y en los últimos años se han realizado esfuerzos por recabar datos que explicaran el origen y evolución de ésta y aportaran información geológica que permita examinar la existencia de agua en forma de hielo y las posibilidades para la mejor ubicación de futuras bases científicas permanentes en el satélite.

Con esos objetivos, en la actualidad nos encontramos con una gran cantidad de sensores que se encargan de determinar un alto número de características lunares alrededor de la topografía, la geomorfología, la mineralogía y la geodesia entre otros ámbitos de estudio.

En la **Tabla 1** se detallan algunas de las características de las misiones y sensores que se han enviado a la Luna. Se han recopilado aquellos instrumentos que por las características de

la información capturada tienen un interés científico dentro de la temática de este artículo, incluyendo así las misiones Clementine, Smart-1, SELENE, Chandrayaan-1 y LRO.

Los objetivos de estas misiones se circunscriben en el ámbito geológico, y así en la misión Clementine se buscaba estudiar la superficie lunar y el asteroide 1620 Geógrafa. Smart-1 de la ESA recopiló datos que ayudaron a responder cuestiones sobre el origen de la Luna y la posible presencia de hielo en su superficie, y en este sentido la misión SELENE ha obtenido datos científicos que han explicado el origen y evolución lunar, y se dispone de la información que va a poder abordar el desarrollo de tecnologías para futuras exploraciones a nuestro satélite. Los experimentos a bordo de Chandrayaan-1 y LRO permiten en la actualidad realizar una cartografía a alta resolución de toda la superficie lunar, distinguiendo la distribución de diferentes elementos como el magnesio, aluminio, silicio, calcio, hierro y titanio, así como algunos de número atómico alto, como el radón, uranio y torio, y evaluar la superficie lunar en vista a futuros aterrizajes para exploraciones humanas en el satélite.

En lo que se refiere a la tipología de los materiales geológicos que se pueden encontrar sobre la superficie lunar, éstos vienen determinados por las condiciones en las que se originó la Luna y la carencia de procesos erosivos de carácter atmosférico, de tal modo se configura la naturaleza de las rocas lunares como de tipo ígneo.

Si bien el origen de la Luna aún se está definiendo, la hipótesis más aceptada es la denominada Teoría del Impacto, que básicamente determina que un cuerpo del tamaño de Marte habría impactado sobre la Tierra hace 4.500 millones de años. Este choque presumiblemente habría expulsado grandes cantidades de material alrededor de la órbita terrestre, y finalmente la Luna se habría formado a través de la acumulación y compactación de estos componentes (Hartmann *et al.*, 1986).

En las primeras etapas de la formación de la Luna, ésta estaría compuesta por una masa de magma que paulatinamente fue solidificando, y durante este tiempo varios eventos de impacto siguieron modificando la superficie lu-

nar. Tras éstos, las lavas fluyeron sobre la superficie formando los mares y más tarde llegarían las erupciones piroclásticas arrojando restos de basalto derretido.

De esta forma, la superficie lunar estaría formada por rocas ígneas procedentes del océano de magma original, y el magma producido por los impactos durante su origen y los eventos volcánicos posteriores. Así la totalidad de las rocas que podemos encontrar sobre la superficie lunar pertenecen al tipo de rocas magmáticas, predominando entre ellas el basalto que cubre los mares lunares (Hartmann *et al.*, 1986).

Área de estudio y datos usados

Sobre la superficie lunar existen, básicamente, dos características que determinan la diversidad de materiales geológicos. Por un lado los cráteres de impacto o astroblemas, y por otro la actividad volcánica.

En este sentido, el área escogida para el estudio de este trabajo ha sido parte de la meseta de Aristarchus, que incluye el cráter del mismo nombre situado en la zona este de la región, el inicio del Vallis Schröteri al norte, con la formación «cabeza de cobra» que corresponde a una depresión originada por actividad volcánica, y el cráter Herodotus al oeste.

Esta región ha sido estudiada en los trabajos de investigación de Mustard *et al.* (2011) y Chevrel *et al.* (2009), en los que se destaca la meseta de Aristarchus como una región de considerable variedad geológica, éstos aportan además resultados de diferenciación de materiales y en el caso del estudio de Chevrel *et al.* (2009), las características mineralógicas de las rocas que componen la región. Las diferencias fundamentales de el trabajo que aquí se presenta respecto a los dos anteriores radica en la resolución espacial y espectral de las imágenes usadas. Así en el trabajo de Mustard *et al.* (2011) el estudio se realizó con datos hiperespectrales del instrumento M3, de 140 m/px. En el trabajo de Chevrel *et al.* (2009) fueron usadas imágenes de la misión Clementine de entre 100 a 325 m/px (Tabla 1). En nuestro caso, y como se señala más adelante, la resolución espacial de las imágenes de SELENE es de 62 m/px, lo que ha permitido la cartografía de

la zona a mayor escala que en los estudios anteriores.

La localización del área de estudio, que se señala de forma generalizada en la **Figura 1**, se encuentra entre las longitudes 46° W- 52° W y las latitudes 22° N- 25° N, y supone una superficie de alrededor de 10.000 km^2 .

En lo que se refiere a los datos usados para la clasificación de materiales, se ha contado con las imágenes capturadas por la misión SELENE, mediante el instrumento MI. Este instrumento se subdivide en dos sensores diferentes, el MI-VIS sensible a las longitudes de onda de 415, 750, 900, 950 y 1000 nm y que conforma una imagen de 5 bandas, y el MI-NIR que captura información en los 1000, 1050, 1250 y 1550 nm agrupados en 4 bandas diferentes.

El satélite SELENE describía, en el momento de la observación, una órbita polar circular a 100 km de altura sobre la superficie lunar y una inclinación de 90° (Matsumoto *et al.*, 2009).

Los detalles de ambos sensores se describen en el artículo de Ohtake *et al.* (2008) y se resumen brevemente en la **Tabla 2**.

El nivel de tratamiento de las imágenes usadas en este proyecto corresponde al L2B, que supone una corrección radiométrica de los datos, del modo descrito también por Ohtake *et al.* (2008). Así, tras esta corrección, la información de las imágenes corresponde a niveles de radiancia.

Por otro lado, las imágenes que han participado en el mosaico final objeto de la clasificación geológica fueron tomadas por la misión SELENE en marzo de 2008.

En la realización práctica de este trabajo se han usado, además de las imágenes obtenidas

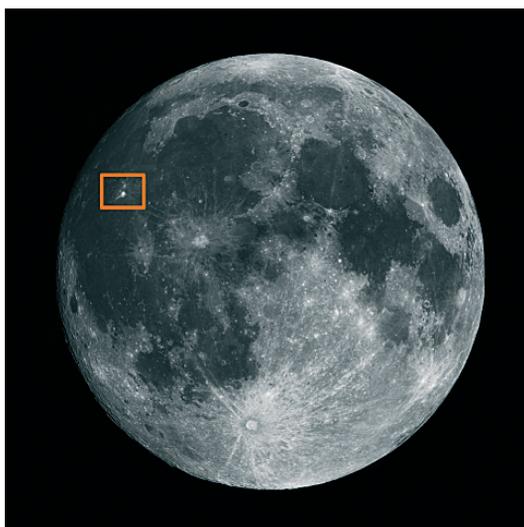


Figura 1. Localización de la meseta de Aristarchus en la cara visible de la Luna.

por la misión SELENE, los datos altimétricos proporcionados por el instrumento LROC de la misión LRO de la NASA.

Metodología

Respecto a la metodología aplicada, se debe señalar que los dos sensores del instrumento MI de la misión SELENE (MI-VIS y MI-NIR) utilizados en este trabajo disponen de resoluciones espaciales diferentes, siendo de 20 m/px para MI-VIS y 62 m/px para MI-NIR, de modo que al ser ensamblados los datos resultantes tienen una resolución de 62 m/px propia del sensor MI-NIR. En este paso se ha aplicado un remuestreo bicúbico, reduciendo la resolución de MI-VIS a la de MI-NIR, para ob-

Tabla 2. Características de los sensores MI-VIS y MI-NIR.

MI	Sensor	Resolución espacial	f	FOV	Banda	Longitud de onda
MI-VIS	2D CCD	20 m/px	65 mm	11°	1	0,415 μm
					2	0,750 μm
					3	0,900 μm
					4	0,950 μm
					5	1,000 μm
MI-NIR	2D InGaAs	62 m/px	65 mm	$11,2^{\circ}$	6	1,015 μm
					7	1,050 μm
					8	1,250 μm
					9	1,550 μm

Tabla 3. Ubicación de las áreas de entrenamiento para el método de Máxima Verosimilitud

Material	Latitud	Longitud
AP, anortosita con clinopiroxeno y olivino fragmentado	23°41'30,5439" N	47°31'14,1576" W
AER, anortosita con piroxenos	23°54'02,6578" N	46°59'23,6153" W
DMD, basalto con material magmático de carácter eruptivo	22°28'20,0361" N	48°50'05,3611" W
HE, plagioclasa, clinopiroxeno y ortopiroxeno	24°14'47,5360" N	50°01'13,5895" W
NE, ortopiroxeno con bajo contenido en feldespato	23°31'19,8119" N	46°23'06,0219" W
OL, olivino	23°17'20,9852" N	46°42'12,4183" W
SC, anortosita con clinopiroxeno	23°00'48,3736" N	47°39'45,5882" W
SW, materiales basálticos ricos en clinopiroxeno	22°30'02,9549" N	47°34'24,0380" W

tener las imágenes finales. La resolución espacial del resultado de este remuestreo es determinante a la hora de poder establecer una escala final del resultado y en total, para la escena cartografiada, han participado 120 imágenes, 60 para cada uno de los sensores, cubriendo un área de alrededor de 10.000 km².

Para la aplicación de las técnicas de clasificación sobre las imágenes originales de SELENE, previamente se han unido los datos de ambos sensores, de modo que conformaran una sola imagen de 9 bandas (Tabla 2). En este sentido, cada una de las imágenes ha sido georeferenciada a partir de la información aportada en la cabecera del fichero de datos, indicando la longitud y latitud lunares, para cada uno de las esquinas de la matriz de píxeles, así como para el punto central de la escena.

Sin embargo los valores de la posición de longitud y latitud no se corresponden exactamente a la situación real de los píxeles de la imagen, sino que en algunos casos pueden venir alterados dependiendo de la dirección y orientación del satélite. Por lo tanto, para georeferenciar correctamente cada una de las escenas se han consultado también las etiquetas de la cabecera que determinan estos dos factores, y poder así georeferenciar correctamente la imagen.

Una vez se tenían las 120 imágenes georeferenciadas, podían unirse entre ellas para conformar la región de estudio.

Clasificación de las unidades geológicas

Para la separación de los diferentes materiales sobre el área de estudio, se ha optado por

realizar una clasificación supervisada por el método de máxima verosimilitud. Por lo tanto, y en la aplicación de este método, se han definido áreas de entrenamiento a las que se les ha asignado un material concreto, en referencia al estudio de Chevrel *et al.* (2009) como se expone más adelante.

El clasificador de máxima verosimilitud (o máxima probabilidad) considera que los datos siguen una función de distribución normal para asignar la probabilidad de que un píxel cualquiera pertenezca a cada una de las clases. El cálculo se realiza para todas las clases, y se le asigna al píxel aquella que maximice la función de probabilidad.

En nuestro caso las áreas de entrenamiento se han seleccionado a partir de la información del estudio de Chevrel *et al.* (2009) reflejado en la **Tabla 3**. De este modo, al tomar las referencias directamente de las imágenes de la misión SELENE, no ha sido necesario determinar la reflectividad de la superficie a partir de los valores de radiancia aportados por los dos sensores, ya que su consideración no variaría el resultado del método aquí usado.

En la nomenclatura de estas diferentes unidades geológicas se ha preferido respetar los nombres dados en el artículo de Chevrel *et al.* (2009) descritos anteriormente, ya que han sido la referencia para la determinación de las zonas que iban a conformar las diferentes áreas de entrenamiento, y la tipología de éstas.

Diferencias entre pasadas

El desarrollo de la clasificación se ha debido realizar sobre dos imágenes diferentes, que corresponden a dos grupos de pasadas del sa-

télite SELENE sobre el área de estudio. Esto ha sido motivado por el diferente ángulo de incidencia solar para cada uno de los grupos de pasadas, que han imposibilitado la fusión de los datos de radiancia entre ellas. Estos valores se muestran muy diferentes para puntos localizados sobre las áreas de solape, incluso tras pretender una corrección de éstos a partir del valor del ángulo de incidencia para cada conjunto de pasadas.

Si bien las diferencias relativas a las condiciones geométricas de la radiación solar, y que se señalan a continuación, no son muy acentuadas en las órbitas consecutivas, sí lo son entre grupos de pasadas no consecutivas.

Hay que señalar que entre pasadas consecutivas, el intervalo temporal que separaba cada una de ellas era de alrededor de 2 horas de tiempo, lo que supone 8 horas de diferencia entre la primera y la última pasada que cubre la zona de estudio. Sin embargo se debe tener en cuenta que un día lunar tiene una duración de alrededor de 28 días terrestres, con lo cual aun pareciendo considerable esa diferencia temporal de 8 horas entre pasadas, suponen unas modificaciones de las condiciones geométricas de la luz solar mínimas. En una aproximación simplificada, sería como situar respecto a la superficie terrestre una diferencia temporal de unos 17 minutos entre la primera y la última pasada de cada grupo.

Se ha estudiado la posibilidad de relacionar el ángulo de incidencia solar con los valores de radiancia de cada imagen, entendiendo que los datos resultantes debieran ser similares para ambas imágenes en las áreas de solape, una vez aplicada esta corrección.

Se debe tener en cuenta que los valores de las imágenes ya están corregidos radiométricamente (recordemos que se está trabajando con imágenes etiquetadas como L2B), y que suponemos que la superficie lunar responde al modelo de un reflector lambertiano, en el que se refleja la energía incidente por igual en todas las direcciones. Por otro lado, debido a las características de la Luna, no debemos contar en este caso con factores atmosféricos ni relacionados con la vegetación, así que tan sólo nos resta establecer la correspondencia entre los valores de los dos grupos de pasadas en base al ángulo de incidencia solar.

Para diseñar esta corrección se optó por aplicar una ecuación que relacionara el coseno del ángulo de incidencia con los datos de ambas imágenes sobre los valores de 12 puntos de muestreo seleccionados en áreas de solape, de modo que se pudiera establecer una relación lineal entre ambas imágenes.

Sin embargo el resultado no ha permitido establecer una correspondencia lineal entre los datos, ya que los valores siguen teniendo diferencias notables y no constantes, como se puede observar en la **Figura 2**.

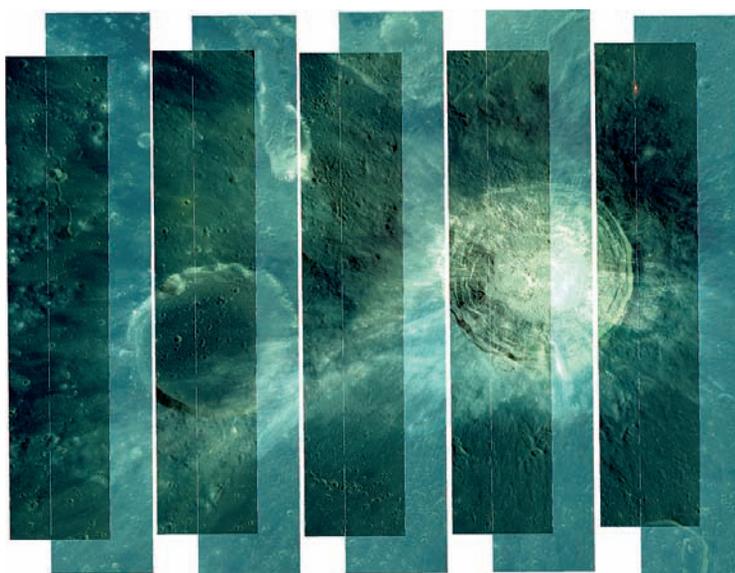


Figura 2. Superposición de los grupos de pasadas en la región de estudio. En esta imagen se puede apreciar la diferencia de valores entre pasadas.

Tabla 4. Separabilidad de los diferentes materiales aplicando la fórmula para el cálculo de la distancia Jeffries-Matusita

	AP	AER	DMD	HE	NE	OL	SC	SW
AP	2,000							
AER	2,000	2,000						
DMD	2,000	2,000	1,999					
HE	2,000	2,000	1,999	1,999				
NE	2,000	2,000	1,999	1,996	2,000			
OL	2,000	2,000	2,000	1,999	2,000	1,995		
SC	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,996	1,999	
SW	2,000	2,000	1,998	1,679	1,999	2,000	2,000	2,000

Ante la imposibilidad de encontrar una correspondencia entre ambas imágenes que permitiera unir las y trabajar con un único origen de datos, la solución que se propone al problema de las diferencias geométricas de la radiación solar entre pasadas, es realizar la clasificación geológica de modo separado para cada uno de los grupos de pasadas seleccionados, y combinar luego los resultados de ambas.

De este modo se puede obtener una información de los materiales geológicos para una superficie mayor que el área cubierta por cada una de las pasadas orbitales, sin que esta información se vea afectada por los diferentes valores de radiancia en las áreas de solape.

Resultados

Separabilidad de los materiales

La separabilidad de los materiales geológicos se muestra en la **Tabla 4**, y ha sido calculada a partir de las estadísticas obtenidas en las regiones de entrenamiento. En este caso, los valores por debajo de 1,9 indican una pobre separabilidad mientras que entre 1,9 y 2 la separabilidad es adecuada. Como se puede observar en la **Tabla 4**, existe una buena separación generalizada entre materiales, si exceptuamos la correspondiente entre las clases HE y SW, en los que esta separabilidad puede considerarse muy pobre con un valor de 1,7.

Sin embargo, el gran parecido de los materiales que componen esta unidad geológica, en la que predomina el clinopiroxeno, y que a su vez está reflejado en la semejanza espectral de

la **Tabla 4**, puede justificar ese valor tan escaso de separabilidad.

Disposición espacial de los materiales

Para tener una visión completa de la clasificación sobre la región de Aristarchus, se ha realizado un solape de los resultados de dicha clasificación sobre los dos grupos de pasadas, mostrando la cobertura total de materiales geológicos sobre esa porción de la meseta (**Figura 3**).

Las imágenes resultantes tras aplicar el método de máxima verosimilitud, muestran en alguna medida una alta diversidad geológica, y una disposición continua de las unidades geológicas. Por un lado, destaca la presencia de la clase AP en el interior del cráter Aristarchus, que también está presente junto al cono volcánico de la formación «cabeza de cobra» del Vallis Schröteri.

La unidad geológica AER cubre la porción norte de la imagen, combinándose hacia el oeste con materiales del tipo DMD y SW. Segui-

Tabla 5. Tamaño de la superficie clasificada para cada tipo de materiales

Material	Porcentaje de superficie	km ²
AP	10,48 %	1.228
AER	53,46 %	6.267
DMD	7,80 %	915
HE	0,76 %	89
NE	6,06 %	711
OL	0,18 %	21
SC	6,15 %	721
SW	15,11 %	1.771

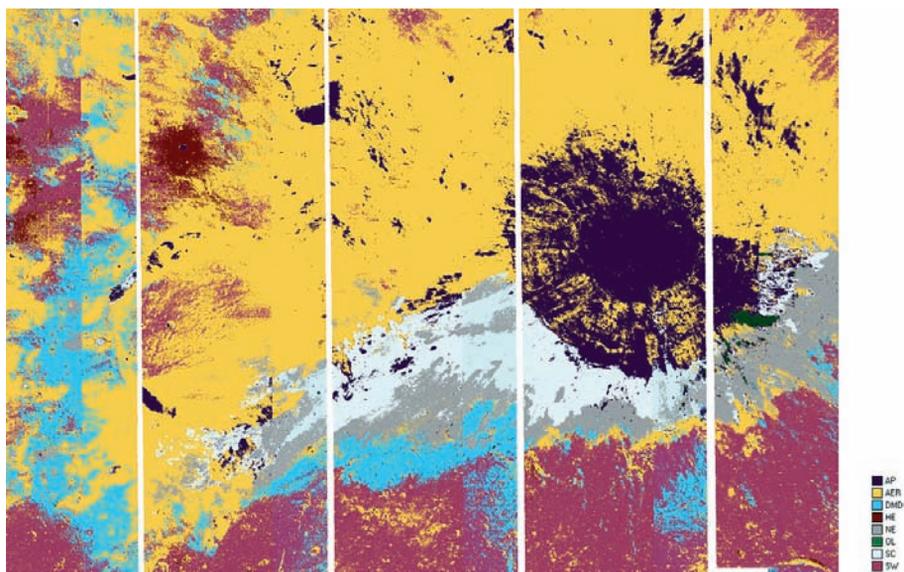


Figura 3. Superposición de los resultados de la clasificación para ambos grupos de pasadas. La clase AP corresponde a anortosita con clinopiroxeno y olivino fragmentado; AER: anortosita con piroxenos; DMD: basalto con material magmático de carácter eruptivo; HE: plagioclasa, clinopiroxeno y ortopiroxeno; NE: ortopiroxeno con bajo contenido en feldespato; OL: olivino; SC: anortosita con clinopiroxeno; SW: materiales basálticos ricos en clinopiroxeno.

damente, y en la región suroeste del cráter, se aprecia una disposición continua, casi de forma paralela, de las clases SC, NE y DMD. Esta disposición pudiera responder a las expulsiones de material a partir del impacto del meteorito, en formas de «cola de gallo».

En la zona sur de la imagen, se distingue la presencia de materiales SW, que también tiene representación en la esquina noreste de la región estudiada.

Por último, hay dos unidades claramente separadas y que abarcan una extensión espacial reducida: la zona OL, compuesta por olivino y que destaca al sureste del cráter Aristarchus; y la zona HE, que corresponde a un pequeño cráter situado al Norte del cráter Herodotus.

Evaluación de los resultados

La evaluación de los resultados obtenidos es uno de los aspectos más comprometidos de este trabajo. Ya se ha señalado que tan sólo se cuenta con un artículo que ha identificado los materiales (Chevrel *et al.*, 2009) y que de hecho ha servido de referente para la ubicación de las clases en los polígonos de entrenamien-

to, y otro material de investigación (Mustard *et al.*, 2011) que propone una separación de materiales geológicos para nuestra área de estudio. Por lo tanto no es posible cotejar la calidad del resultado con otros trabajos ni, mucho menos, con muestras de campo.

Respecto a la presencia de olivino en la región de Aristarchus, que tiene su referencia en la clase OL, ésta aparece pobremente representada en el trabajo de Chevrel *et al.* (2009), si bien, y como se desarrolla más adelante, no existen dudas de la presencia de este mineral en esa posición sureste del cráter Aristarchus.

Por otro lado, una de las consideraciones que usó el equipo de investigación del cráter Aristarchus (Mustard *et al.*, 2011), para la determinación de las características geológicas de éste, fue aplicar el algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM), sobre los datos aportados por la misión Chandrayaan-1. En este caso, y como se puede comprobar en la **Figura 5**, la diferenciación del olivino es clara, y coincide con la presencia de éste en la **Figura 4**.

En este trabajo de investigación de Mustard *et al.* (2011), no se analiza el tipo de materiales que componen el cráter de Aristarchus (salvo en el caso del olivino, comentado anterior-

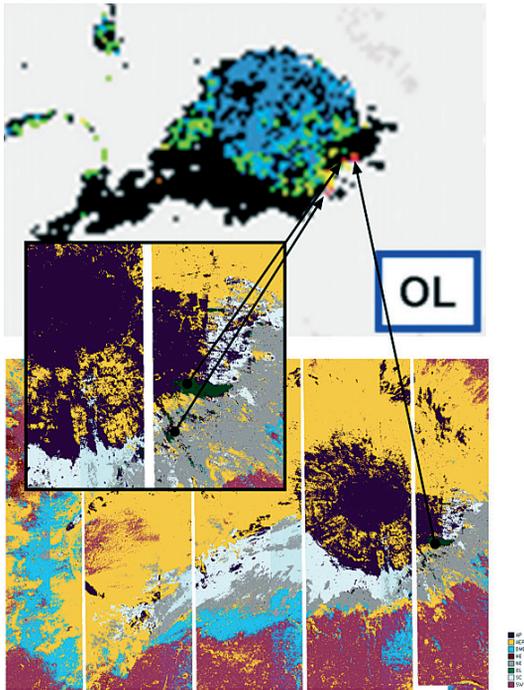


Figura 4. Localización de la clase OL en el trabajo de Chevrel *et al.* (2009) y en los resultados de la clasificación obtenidos en este trabajo.

mente), sino que propone un método de clasificación geológica que separa las diferentes clases de materiales del área de estudio tal y como se muestra en la **Figura 6**.

Se puede apreciar cómo se da una distribución coherente de materiales entre la Figura 3

referente a los resultados obtenidos en nuestro trabajo y la Figura 6. Por un lado la unidad AP está claramente representada en el interior del cráter Aristarchus, y en menor medida en el cono volcánico de la formación «cabeza de cobra» del Vallis Schröteri. En los resultados obtenidos en la realización práctica de nuestro proyecto la localización y distribución de materiales es similar.

También se observa de forma diferenciada la presencia de olivino, que como se ha detallado anteriormente está situado en el sector sureste del cráter Aristarchus, y que viene claramente diferenciado en rojo sobre la Figura 5.

Por otro lado, se aprecia una distribución paralela idéntica entre las clases SC (azul claro), NE (gris), DMD (azul) de la imagen que se ha obtenido en nuestro trabajo, y la gama de colores propuestos en la misma región para el resultado de Mustard *et al.* (2011).

Un material que aparece claramente reconocible, y que es algo marginal en la escena, es el correspondiente a la clase HE, localizado en un pequeño cráter sobre el cráter Herodotus, y que se muestra en la Figura 6 claramente resaltado con un verde amarillento. En nuestro resultado este material corresponde a la unidad coloreada en marrón y situada sobre el mismo punto que corresponde a materiales ricos en plagioclasa, clinopiroxeno y ortopiroxeno. También se distingue la distribución uni-

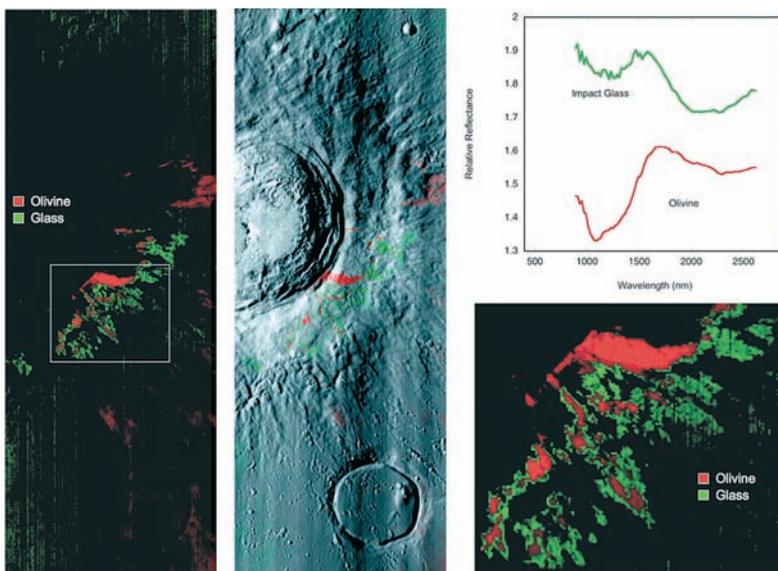


Figura 5. Aplicación del algoritmo SAM sobre los datos de M3 (Mustard *et al.*, 2011), para la clasificación del olivino.

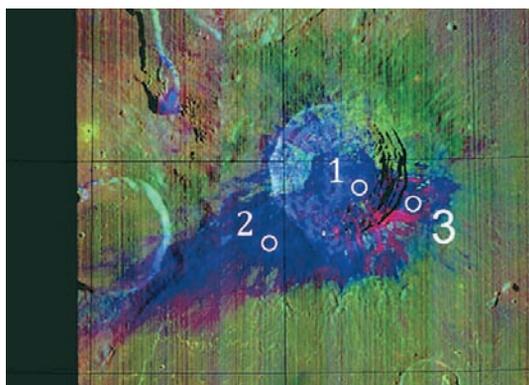


Figura 6. Aplicación del algoritmo SAM sobre los datos de M3 (Mustard *et al.*, 2011), para la clasificación del olivino.

forme y continua de la clase AER en el sector norte de la imagen. Esta diferenciación es ampliamente más clara que en el anterior trabajo comparado de Chevrel *et al.* (2009).

Para determinar el grado de coincidencia entre las clasificaciones de las imágenes correspondientes al primer y segundo grupo de pasadas, se ha realizado un conteo de píxeles según su correspondencia entre clases.

Para ello se ha elaborado un sencillo algoritmo, cuyo resultado se refleja en la **Tabla 6**. Este algoritmo identifica la coincidencia de las diferentes clases entre ambas pasadas, generando una matriz de confusión que posteriormente puede ser evaluada.

A partir de los resultados obtenidos en la **Tabla 6**, se puede calcular fácilmente el porcentaje de coincidencia entre clases. Así, el resultado global que obtenemos en nuestro caso es de un 68,02% de correspondencia entre clases.

Como se puede observar se dan en algunos casos valores individuales de coincidencia considerablemente bajos, como HE para el primer grupo de pasadas, o DMD en el caso del segundo grupo, debido principalmente a la escasa presencia de esos materiales en las imágenes recíprocas.

En este punto hay que señalar, que las imágenes analizadas no estaban corregidas geométricamente entre sí, con lo cual es posible que no exista una correspondencia completa entre la ubicación de un píxel de una y otra imagen.

Aún y todo, el porcentaje de coincidencia se considera bueno, teniendo en cuenta este último aspecto señalado, y las dificultades que se han indicado a lo largo del trabajo referentes a la ubicación de las áreas de entrenamiento y a la separación entre clases.

En este sentido, y como se puede observar en la **Figura 3**, se da una incongruencia en los resultados para ambos grupos de pasadas en la región Oeste de la imagen, mayormente para los materiales AER, DMD y SW, aunque en el resto de la imagen se comportan de manera coherente entre sí. Para la cartografía final se ha escogido el grupo de pasadas que de forma más uniforme respondía a la localización de los materiales.

Por último, y con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados obtenidos se ha realizado un documento cartográfico, mostrado en la **Figura 7**. Para la correcta transformación de los datos se han proyectado éstos sobre el sistema de referencia Moon 2000 definido por la International Astronomical

Tabla 6. Número de píxeles coincidentes entre clases

Segunda pasada	Primera pasada									
	Sin solape	AP	AER	DMD	HE	NE	OL	SC	SW	Coincidencia
Sin solape	114177	113438	481719	24243	21868	48121	4341	69078	172516	
AP	97385	108718	60687	371	394	2126	48	1494	380	62,40%
AER	515839	16831	632837	47891	15614	19050	458	3627	87279	76,84%
DMD	139826	390	50254	73907	12653	17960	157	54	89999	30,12%
HE	77	5	152	12	1224	0	0	0	114	81,22%
NE	54464	3583	19703	590	1	82316	60	23181	18	63,59%
OL	223	660	71	21	0	1753	1011	68	1	28,20%
SC	60734	22337	9827	27	0	12322	24	57801	2	56,48%
SW	117284	148	23003	7938	2987	379	1	0	226148	86,78%
Coincidencia		71,21%	79,45%	56,52%	3,72%	60,57%	57,48%	67,04%	55,99%	

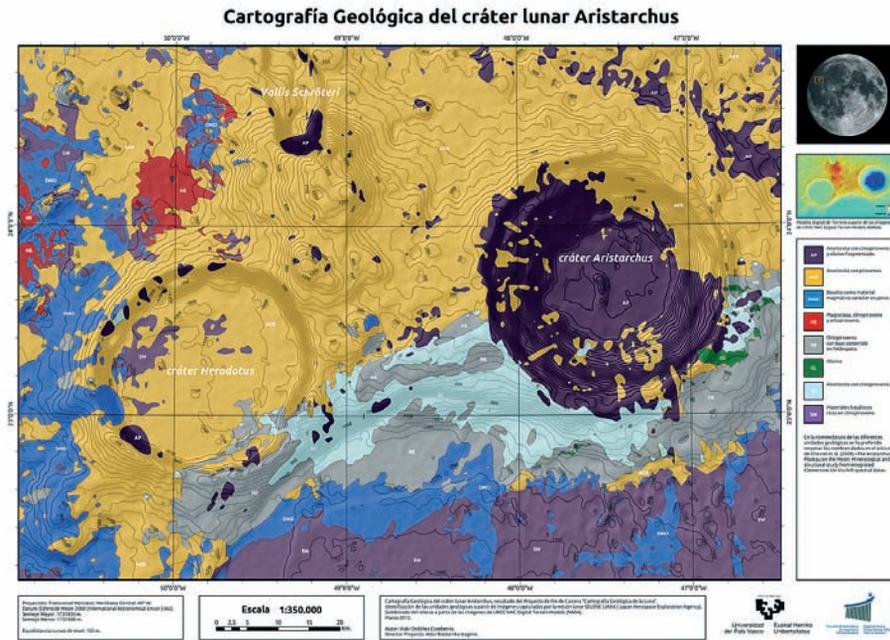


Figura 7. Documento cartográfico, a partir del resultado de la clasificación de materiales geológicos.

Union. Además se ha incluido la información altimétrica derivada del modelo digital de terreno obtenido a partir de las imágenes de la misión LROC, a modo de sombreado de relieve y curvas de nivel y por último la proyección cartográfica aplicada ha sido la Transversa de Mercator. De este modo, y teniendo en cuenta la resolución espacial de las imágenes, se ha confeccionado la cartografía mineralógica de la zona a una escala 1/350.000.

Conclusiones

Desde los inicios de la cartografía lunar hasta la actualidad se ha avanzado de manera determinante, apoyándose las diferentes agencias espaciales en la teledetección. Para la aplicación de estas técnicas de teledetección sobre imágenes lunares, se cuenta con diversas fuentes de datos hiperespectrales y multispectrales, distribuidas por las diferentes agencias espaciales internacionales.

En nuestro caso, con los datos aportados por los instrumentos MI-VIS y MI-NIR de la misión SELENE se ha podido realizar una clasificación de materiales lunares de la superficie del satélite.

Del mismo modo que en anteriores trabajos, el área de estudio escogido ha respondido a una diversidad geológica elevada, y las diferentes clases obtenidas en el resultado de la clasificación se han localizado de forma coherente con estos trabajos previos. Sin embargo esta clasificación, para ser resuelta positivamente ha tenido que apoyarse en el trabajo de Chevrel *et al.* (2009), impidiendo de este modo realizar una evaluación cuantitativa del resultado, más allá del propuesto en la coincidencia de las áreas de solape de los dos grupos de pasadas. Este último método nos ha devuelto una coincidencia de disposición idéntica de materiales entre las dos imágenes del 68%.

Por otro lado, la evaluación del resultado se muestra compleja en este ámbito de estudio, si bien los resultados propuestos tienen cierta correspondencia al menos cualitativa con anteriores trabajos en el mismo área. Por lo tanto con esta limitación en la evaluación se entiende el resultado obtenido como un resultado preliminar para una futura cartografía geológica de la región de Aristarchus, apoyada en otros métodos.

La resolución espacial de las imágenes que han determinado la clasificación y diferenciación de las unidades geológicas, que corres-

ponden a 62 metros por píxel, posibilita la edición de un documento cartográfico a una escala de 1:350.000. De este modo se ha obtenido la cartografía mineralógica a mejor escala de la región de estudio hasta la fecha.

Los siguientes pasos de trabajo debieran encajarse en determinar, de forma menos dependiente de trabajos previos, la tipología de materiales mediante la comparación de firmas espectrales de laboratorio de muestras lunares obtenidas por las misiones Luna y Apolo. Esto incluye el cálculo de la reflectividad a partir de los niveles de radiancia de las imágenes para disponer de resultados que permitan la comparación con los datos de laboratorio y de muestras lunares.

Referencias

- Chevrel, S. D., Pinet, P. C., Daydou, Y., Mouélic, S. Le, Langevin, Y., Costard, F., & Erard, S. 2009. «The Aristarchus Plateau on the Moon: Mineralogical and structural study from integrated Clementine UV-Vis-NIR spectral data». *Icarus*, (199), pp. 9-24.
- Clark, Roger N., Swayze, Gregg A., Livo, K. Eric, Kokaly, Raymond F., Sutley, Steve J., Dalton, J. Brad, McDougal, Robert R. & Gent, Carol A. 2003. «Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems». *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E12). ISSN 2156-2202.
- Hartmann, W. K., Phillips, R. J., & Taylor, G. J. (Eds.) 1986. *Origin of the Moon*. Jaumann, R., Hiesinger, H., Anand, M., Crawford, I. A., Wagner, R., Sohl, F., Jolliff, B. L., Scholten, F., Knapmeyer, M., Hoffmann, H., Hussmann, H., Grott, M., Hempel, S., Kohler, U., Krohn, K., Schmitz, N., Carpenter, J., Wieczorek, M., Spohn, T., Robinson, M. S., & Oberst, J. 2012. «Geology, geochemistry, and geophysics of the Moon: Status of current understanding». *Planetary and Space Science*, 74(1), pp. 15-41.
- Matsumoto, S., Tayama, S., Iwamoto, Y., Ogo, K., Tanaka, K., & Iwayama, Y. 2009. «Operation and Evaluation Results of KAGUYA Attitude and Orbit Control System on Lunar Orbit». Japan Aerospace Exploration Agency.
- Mustard, J. F., Pieters, C. M., Isaacson, P. J., Head, J. W., Besse, S.; Clark, R. N., Klima, R. L., Petro, N. E., Staid, M. I.; Sunshine, J. M.; Runyon, C. J., & Tompkins, S. 2011. «Compositional diversity and geologic insights of the Aristarchus crater from Moon Mineralogy Mapper data». *Journal of Geophysical Research*, 116.
- Nittler, L. R., McCoy, T. J., Clark, P. E., Murphy, M. E., Trombka, J. I., & Jarosewich, E. 2004. «Bulk element compositions of meteorites: A guide for interpreting remote-sensing geochemical measurements of planets and asteroids». *Antarctic Meteorite Research*, 17, p. 231.
- Ohtake, M., Haruyama, J., Matsunaga, T., Yokota, Y., Morota, T., Honda, C., & the LISM Working Group. 2008. «Performance and scientific objectives of the SELENE (KAGUYA) Multiband Imager». *Earth Planets Space*, 60, pp. 257-264.
- Pallé, E., R., Zapatero Osorio M., Barrena, R., Montañés-Rodríguez, P., & Martín, E. L. 2009. «The Earth's transmission spectrum from lunar eclipse observations». *Nature*, 459, pp. 814-816.
- Wilhelms, D. E., Howard, K. A., & Wilshire, H. G. 1979. *Geologic Map of the South Side of the Moon*. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.