



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS DE LA TOPOGRAFÍA EN LAS ZONAS DE ALUNIZAJE DE LAS MISIONES APOLO DE LA NASA

Alumno: Pablo César Velázquez de Castro López

Tutor: Prof. D. José Luis García Balboa
Dpto: Ingeniería Cartográfica, Geodésica y
Fotogrametría

Septiembre, 2017



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Don JOSÉ LUIS GARCÍA BALBOA, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado:
ANÁLISIS DE LA TOPOGRAFÍA EN LAS ZONAS DE ALUNIZAJE DE LAS
MISIONES APOLO DE LA NASA, que presenta PABLO CÉSAR VELÁZQUEZ DE
CASTRO LÓPEZ, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela
Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, SEPTIEMBRE de 2017

El alumno:

PABLO VELÁZQUEZ DE CASTRO LÓPEZ

Los tutores:

JOSÉ LUIS GARCÍA BALBOA

Índice

1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS	5
2.1. Generales	5
2.2. Específicos.....	6
3. ANTECEDENTES	7
3.1. Características lunares.....	7
3.2. Cartografía planetaria.....	8
3.2.1. Concepto de cartografía planetaria	8
3.2.2. Breve repaso histórico.....	8
3.2.3. Metodología en cartografía planetaria	11
3.2.4. Nuevos retos de la cartografía planetaria	17
3.3. Datos geográficos de la Luna disponibles en la red	18
3.3.1. Misiones cuyos datos son accesibles desde la red	18
3.3.2. Organismos y plataformas en línea para descarga de datos planetarios.....	21
3.4. Misiones del Programa Apolo.....	31
4. MATERIAL Y METODOLOGÍA.....	56
4.1. Material	56
4.1.1. Datos	56
4.1.2. Software.....	57
4.2. Metodología	59
4.2.1. Definición del sistema de coordenadas de referencia.....	59
4.2.2. Metodología para el análisis de las zonas de alunizaje	61
4.2.3. Realización de la cartografía	76
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	81
5.1. Zona de alunizaje Apolo 11	81
5.2. Zona de alunizaje Apolo 12.....	90
5.3. Zona de alunizaje Apolo 14.....	99
5.4. Zona de alunizaje Apolo 15.....	108
5.5. Zona de alunizaje Apolo 16	117
5.6. Zona de alunizaje Apolo 17	126
5.7. Análisis comparativo entre zonas de alunizaje	135
6. CONCLUSIONES.....	140
REFERENCIAS.....	142

Índice de figuras.....	145
Índice de tablas.....	148
ANEXO 1. Cartografía de las zonas de alunizaje.....	149

1. INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta la memoria correspondiente al Trabajo de Fin de Grado (TFG) titulado “Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA” de la titulación Grado en Ingeniería Geomática y Topográfica.

La geomática es una disciplina que engloba las Geociencias con la integración y aplicación de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Esta suma hace posible la captura, procesamiento, análisis, interpretación, almacenamiento, modelización, aplicación y difusión de información digital geoespacial o localizada, aplicable en los ámbitos de la ingeniería, el territorio y la sociedad.

La Ingeniería Geomática comprende un variado registro de aplicaciones que nos permite conocer y procesar la posición y las dimensiones de cualquier cosa, desde microbios a planetas. En este sentido cósmico, el rápido desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las tecnologías web, que junto con la información obtenida por los diferentes sensores de las sondas espaciales que orbitan diferentes cuerpos del Sistema Solar, ofrecen grandes oportunidades para la cartografía y el estudio de territorios extraterrestres por métodos cartográficos.

Los datos capturados por los distintos sensores de las distintas misiones espaciales que exploran o han explorado distintos objetos astronómicos del Sistema Solar son de fácil acceso a través de la red, dadas las políticas de acceso de los distintos organismos responsables. El procesado de estos datos permite obtener información valiosa para ampliar los conocimientos sobre estos cuerpos, detalles y fenómenos que ocurren mucho más allá de nuestro planeta, hasta ahora desconocidos para la humanidad.

Este TFG opta por este ámbito diferente al habitualmente utilizado para aplicación de la Geomática, de manera que lo que pretende es analizar la topografía de las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA, previa selección e incorporación a un SIG de la información geográfica de la Luna. Esto pone de manifiesto que nuestro planeta no es el límite de la Geomática, sino que esta

disciplina avanza en paralelo al desarrollo tecnológico tanto en el ámbito terrestre como en el ámbito de la exploración planetaria.

Este trabajo se encuentra dividido en cuatro bloques en los que se va aportando información y llevando a cabo los diferentes procesos necesarios para cumplir los objetivos del mismo (ver Figura 1.1). El primer bloque consta de una introducción, se plantean los objetivos del trabajo y los antecedentes. El segundo bloque se aborda la metodología necesaria para llevar a cabo el análisis así como los resultados obtenidos. En el tercer bloque se procede al análisis propiamente dicho a la luz de los resultados obtenidos en el bloque anterior y se extraen conclusiones. Y en el cuarto bloque se presentan los productos cartográficos derivados de los análisis.

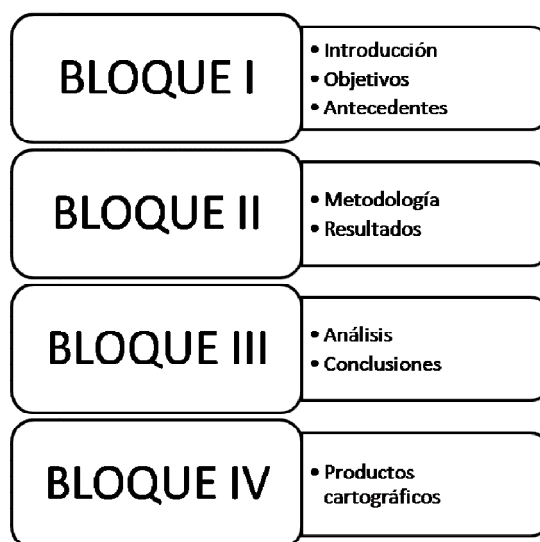


Figura 1.1 Estructura del TFG

2. OBJETIVOS

2.1. Generales

El objetivo general de este TFG es analizar las características topográficas de las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA, resaltando las diferencias encontradas.

Para ello se pretende seleccionar, e incorporar a un SIG, información geográfica de la Luna disponible en plataformas en línea, como es el caso de MAP2 (Map-a-planet 2 mosaic projection web service) del United States Geological Survey (USGS).

Con este trabajo se pretende reunir y poner en práctica los conocimientos y competencias adquiridas en la superación de las diferentes asignaturas que conforman el Plan de Estudios de esta titulación. Especialmente, los referentes al tratamiento, gestión y análisis del terreno mediante los Sistemas de Información Geográfica, y también los conocimientos referentes al diseño y producción de cartografía.

2.2. Específicos

Este TFG plantea una serie de objetivos específicos cuya consecución dará como resultado la culminación de este trabajo. Estos objetivos son:

- Revisión de los datos geográficos disponibles en la red de las distintas misiones que han explorado la Luna, fundamentalmente los disponibles en la plataforma MAP2.
- Revisión y resumen de las características de las distintas misiones Apolo, haciendo hincapié en las motivaciones que llevaron a la elección de las distintas ubicaciones de alunizaje.
- Selección de productos de interés de la plataforma MAP2 o similares. Definición de ventanas geográficas de interés, teniendo en cuenta la localización de los alunizajes y la información recogida en los metadatos.
- Incorporación de los datos a un SIG FOSS y ejecución de los distintos procesamientos que nos permitan analizar la topografía.
- Presentar salidas gráficas derivadas de los análisis topográficos.
- Discusión de las características topográficas del terreno en cada zona de alunizaje, insistiendo en las diferencias encontradas.

3. ANTECEDENTES

3.1. Características lunares

La Luna es el único satélite natural de la Tierra. Tiene un diámetro de 3.474 km y una masa de $7,349 \times 10^{22}$ kg, lo que la convierte en el quinto satélite más grande del Sistema Solar. Su densidad es de $3,34 \text{ g/cm}^3$ y tiene una superficie de 38 millones de km^2 . Se encuentra en relación sincrónica con la Tierra, siempre mostrando la misma cara hacia la Tierra. Se encuentra a una distancia de la Tierra de 384.000 km, aunque esta distancia varía en función de la órbita lunar.

La teoría más aceptada en la actualidad sobre su formación es la teoría del gran impacto, que dice que la Luna se formó hace 4.500 millones de años como consecuencia del impacto de un cuerpo celeste del tamaño de Marte con la Tierra. Este hecho provocó que gran cantidad de material se quedara en órbita alrededor de la Tierra y posteriormente se fusionó para formar la Luna.

En el relieve característico lunar, formado por una gran cantidad de cráteres y amplias planicies, se distinguen principalmente:

- Mares lunares: grandes extensiones llanas, formadas por rocas basálticas y normalmente rodeados de formaciones montañosas. Estas regiones fueron llamadas mares por Galileo Galilei cuando apuntó su telescopio a la Luna en el año 1610, debido a que eran las regiones más oscuras.
- Continentes: regiones montañosas y brillantes llenas de cráteres. Las formaciones montañosas más altas llegan a alcanzar los 8.200 metros de altitud.
- Cráteres: debido a la falta de atmósfera que impide los impactos de meteoritos, se produce un efecto considerable sobre el relieve lunar por simple acumulación en espacios de tiempo a escala geológica. Se caracterizan por presentar depresiones circulares y algunos llegan a alcanzar los 270 km de diámetro.

3.2. Cartografía planetaria

3.2.1. Concepto de cartografía planetaria

La cartografía planetaria es una de las ramas más interesantes de la investigación cartográfica. Su área de interés es la cartografía de objetos extraterrestres como planetas, satélites naturales de los planetas, asteroides y cometas. Se define como la totalidad de los esfuerzos necesarios para calibrar, localizar, registrar, analizar y presentar datos espaciales sobre las superficies planetarias.

Los datos utilizados en la realización de esta cartografía provienen de equipos tecnológicamente avanzados cuya mejora evoluciona constantemente. Tales instrumentos permiten descubrir y estudiar en detalle objetos y fenómenos que ocurren mucho más allá de nuestro planeta. La enorme cantidad de datos enviados a la Tierra son procesados y accesibles en forma de mapas de diversos tipos: topográficos, geológicos, geomorfológicos, etc.

La experiencia pasada de la exploración lunar y planetaria apoya el esfuerzo en el ámbito de la cartografía planetaria como componente fundamental para cualquier programa exitoso de exploración planetaria. La geodesia y la producción de mosaicos de imágenes, para desarrollar sistemas de coordenadas bien definidos para referenciar todas las actividades de exploración; cartografía geológica, para identificar cuestiones científicas y los recursos in situ de mayor valor; así como los sistemas de información geográfica, que proporcionan herramientas para el análisis de estos datos planetarios, son algunas de las aplicaciones de la cartografía planetaria. Es particularmente útil a la hora de seleccionar las zonas de aterrizaje de sondas robóticas o seres humanos de forma segura.

La Comisión de Cartografía Planetaria de la Asociación Cartográfica Internacional se dedica a la investigación y difusión de este campo de la cartografía.

3.2.2. Breve repaso histórico

El telescopio y la fotografía fueron una herramienta fundamental para la recopilación de datos de la superficie de los planetas en la era de las misiones

espaciales. La Luna fue el objeto más común de observación, debido a su proximidad y a su falta de atmósfera que dificultara las observaciones. El astrónomo y cartógrafo Michel Florent van Langren fue el autor del primer mapa de la Luna en 1645. Este mapa ilustraba mares lunares, cráteres y montañas.

A partir de ese momento comenzó el desarrollo de la selenografía (parte de la astronomía que trata de la descripción de la Luna). Tobias Mayer realizó la primera designación de coordenadas selenográficas de varias docenas de objetos sobre la superficie lunar. Johannes Madler midió la altura de alrededor de 1.000 montañas y el diámetro de 150 cráteres. Julius Schmidt creó el atlas más detallado de la Luna hasta 1910.

Un periodo importante en el desarrollo de la cartografía lunar ocurrió a finales del siglo XIX y principios del XX con la aplicación de la fotografía en la investigación astronómica. Los primeros atlas lunares fotográficos fueron desarrollados entre 1886 y 1910 por M.Loewy y P. Puisaux en el observatorio de París y al mismo tiempo en Estados Unidos por S.Burnham y E. Holden.

Entre 1960 y 1980 vemos tres tendencias principales en la cartografía planetaria. La primera se relaciona con los mapas desarrollados como resultado del análisis y generalización de los datos obtenidos en observaciones terrestres. Las observaciones en el lado visible de la Luna fueron un apoyo importante del Programa Apolo. Dieron lugar a trabajos como la Carta Astronáutica Lunar en 44 hojas a escala 1:1.000.000 y la Carta Intermedia Apolo escala 1:500.000 del área ecuatorial en 20 hojas. Otra tendencia se basa en la investigación utilizando métodos de radar, que llevó al descubrimiento de cráteres y la posibilidad de representar los primeros mapas esquemáticos de planetas como Mercurio y Venus. Y a finales de la década de 1970 surgió la tercera tendencia, los mapas se desarrollaron sobre la base de datos de mediciones recopilados satélites artificiales, sondas espaciales y vehículos remotos que lograron posarse en otros planetas. Las fotografías que fueron transmitidas a la Tierra fueron procesadas con métodos fotogramétricos. Al principio todo el esfuerzo se concentró en la exploración lunar, las mediciones realizadas por los satélites artificiales lunares permitieron planear puntos de alunizaje para posteriores misiones y la elaboración de mapas a gran

escala (1:25.000) (ver Figura 3.1). Los datos recogidos durante el Programa Apolo se utilizaron en la preparación de una serie de mapas a escala 1:250.000, que cubrían el 25% de la cara visible de la Luna.

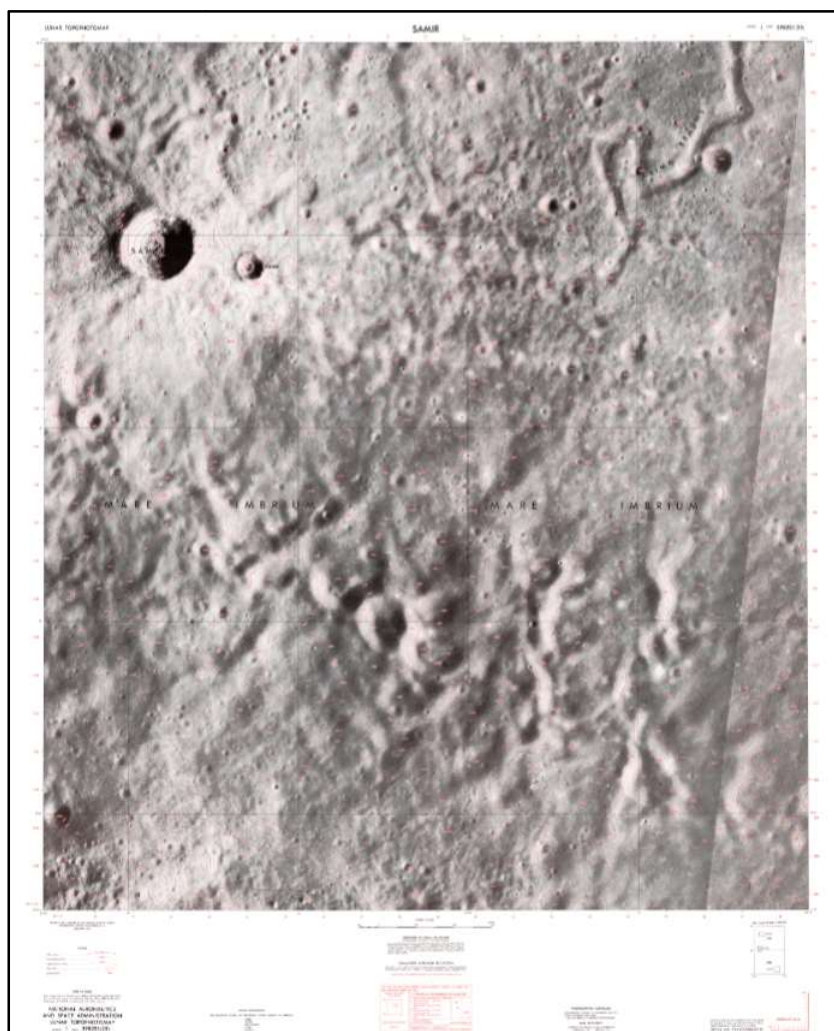


Figura 3.1. Mapa escala 1:25.000 (Mare Imbrium)

Desde entonces, debido al envío de naves espaciales a diferentes cuerpos celestes, se desarrollaron mapas de cada uno de ellos.

El periodo desde principios de 1990 hasta la actualidad trajo consigo nuevas posibilidades de desarrollo de la cartografía planetaria. Esto fue posible gracias al desarrollo de las tecnologías informáticas, la cartografía digital, los métodos de modelado espacial tridimensional, así como la intensificación de las misiones espaciales y el desarrollo de los equipos de medición. Otro factor importante en este

periodo ha sido la tecnología de los sistemas de información geográfica, los SIG han permitido a los investigadores de las ciencias planetarias acumular, manipular, actualizar, analizar y mostrar datos geográficos planetarios. Ha permitido llevar a cabo cartografía y análisis complejos, compartir información y ayudar en las selecciones de zonas de aterrizaje para misiones robóticas.

Actualmente la cartografía planetaria se enfrenta a la necesidad de introducir una normalización a gran escala en la interpretación y clasificación de objetos topográficos y métodos de representación cartográfica, incluyendo la estandarización del sistema de símbolos cartográficos en mapas especializados.

3.2.3. Metodología en cartografía planetaria

3.2.3.1. Datos y procesamiento de los datos

El flujo de trabajo para la cartografía planetaria está basado en los resultados del procesamiento de las imágenes y el análisis espacial de los datos recibidos por las diferentes naves espaciales que exploran el Sistema Solar.

La mayoría de los datos recibidos se estructuran de acuerdo con el estándar Sistema de Datos Planetarios (PDS) y son proporcionados por diferentes organismos (USGS, LPI, etc.) o agencias espaciales nacionales (NASA, ESA, JAXA, etc.). En el caso de la Luna, los datos más recientes son los enviados por la sonda Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) de la NASA y de la sonda SELENE/Kaguya de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Estas misiones proporcionan datos de gran alcance de la superficie lunar. Estos conjuntos de datos son procesados para su posterior utilización en un SIG.

El trabajo planetario, por lo general, está limitado a los datos de detección remota y, por lo tanto, los datos primarios para el estudio son las imágenes, el terreno y los datos derivados de ellos.

En cuanto a imágenes, el dispositivo de captura moderno para la adquisición de imágenes es el dispositivo de carga acoplada (CCD), los cuales pueden ser utilizados de diferentes maneras. Para que los datos de imagen sean útiles para la medición directa y la interpretación, los datos deben de corregirse radiométrica y geoméricamente para proporcionar una imagen que se asemeje a un “mapa”.

El tipo más simple de imágenes utiliza un CCD cuadrado o rectangular para capturar fotones en todos sus píxeles de una sola exposición. Las imágenes de este tipo son ideales para las misiones de sobrevuelo u otras aplicaciones en las que la orientación relativa de la cámara y el objetivo pueden ser muy variables. Por el contrario, cuando una nave espacial está en una órbita regular de un cuerpo planetario, se puede usar una matriz pushroom. Esta es una sola línea de píxeles en un CCD que está orientado perpendicularmente a la dirección de vuelo de la nave espacial o satélite. Permite al instrumento reunir los datos y leerlos en una línea de píxeles a la misma velocidad que avanza, permitiendo la recogida de imágenes continuas, como es el caso de Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO), principal proveedor de datos de este trabajo.

En todos los casos, las imágenes en bruto del satélite son relativamente inútiles hasta que se procesan a través de rutinas que convierten los niveles digitales capturados a valores que tengan algún significado cuantificable. Esto se denomina procesamiento fotométrico de la imagen y se hace, generalmente, mediante algoritmos proporcionados por los equipos de los instrumentos. El resultado deseado es que la imagen quede libre de errores y ruido inducidos por el instrumento, y proporcionar valores a los píxeles que sean consistentes entre sí y comparables con otras imágenes tomadas por el mismo instrumento. También deben corregirse geoméricamente, es decir, tomar la imagen capturada por el CCD y convertirla en una imagen que este en algún tipo de proyección de modo que la relación física entre píxeles sea conocida. Los resultados de este procesamiento son básicos para la cartografía planetaria, tales como puntos de control, que proporcionan coordenadas para objetos de la superficie, basados en el ajuste de haces mediante ajustes mínimo cuadráticos usando un gran número de imágenes superpuestas. Es fundamental para la producción de mapas geoméricamente precisos.

Después del procesamiento y conversión al formato estándar PDS, se pueden usar los datos en un SIG para el análisis espacial y la catalogación de objetos de superficie planetaria.

La obtención de información tridimensional de objetos de nuestro Sistema Solar no es tan simple como tomar una imagen. Existen algunos métodos de captura directa, pero también muchas maneras de derivar el terreno de manera fiable a partir de imágenes. Una forma es explotar las sombras generadas por las formas del relieve.

Los métodos de captura directa para la obtención de datos del terreno han sido hasta ahora los altímetros láser (por ejemplo, LOLA del LRO), que envían un pulso de luz láser desde el satélite en órbita y, con la medición del tiempo de retorno y la posición relativa del satélite respecto al centro de masas del cuerpo celeste, se puede derivar la información sobre el terreno.

3.2.3.2. Herramientas

Para la realización del procesado de los datos y los posteriores análisis de los mismos, existen software tanto comerciales como de código abierto. El principal merito del software comercial es que la mayoría de los programas son relativamente sencillos de instalar y usar, y tienen documentación de calidad y soporte al cliente. Sin embargo, el software de código abierto permite la inspección completa del funcionamiento interno de sus algoritmos.

Herramientas para el procesamiento de imágenes:

- ISIS: Integrated Software for Imagers and Spectrometers. Es la herramienta principal para el procesamiento de imágenes planetarias. Fue desarrollado por el USGS y es de dominio público. Contiene modelos de cámaras y rutinas de procesamiento fotométrico.
- IDL y ENVI: Interactive Data Language. IDL es un lenguaje de especificación de interfaces y no un tipo de herramienta específica. Sin embargo, varios equipos de instrumentos planetarios han implementado sistemas de

procesamiento de imágenes para los datos dentro de IDL que son compartidos. Se usa conjuntamente con el software ENVI, de la misma compañía, que es una herramienta para el procesamiento de imágenes geoespaciales.

- DaVinci: es también un lenguaje informático desarrollado principalmente para tareas de procesamiento de imágenes y manejo de datos multiespectrales. Se utiliza junto con ISIS para procesar datos PDS en JMARS (ver más abajo).

Herramientas para la reconstrucción del terreno:

- SOcET SET: es un software de fotogrametría digital. Requiere de visualización especial para que el operador pueda ver el paralaje en las imágenes y seleccionar puntos de control de alta calidad. También tiene la capacidad de editar interactivamente modelos digitales del terreno después del procesamiento automático. Este software ha sido utilizado por el USGS para la creación de modelos digitales del terreno planetarios desde finales de los años 90.
- NASA Ames Stereo Pipeline: son una serie de programas disponibles bajo una licencia de código abierto. Esta escrito para realizar el procesamiento automático de imágenes estéreo de una amplia variedad de instrumentos planetarios.

Herramientas geoespaciales:

- GDAL: Geospatial Data Abstraction Library. Es principalmente un traductor de formatos de datos geoespaciales aunque permite mucho más que simples traducciones y proporciona una gran cantidad de programas que facilitan el trabajo con datos geoespaciales.
- Bases de datos geoespaciales: muchos sistemas de base de datos también proporcionan extensiones geoespaciales (por ejemplo, MySQL, PostgreSQL con PostGIS). Estos módulos permiten a los usuarios guardar ubicaciones de puntos, polígonos y otros datos geoespaciales en la base de datos.
- Sistemas de información geográfica: proporcionan un entorno integrado para los datos geoespaciales, lo que permite la inspección y consulta de los datos

en una interfaz relativamente fácil y poderosa. Varios SIG se han adaptado o se pueden utilizar para datos planetarios:

- ArcGIS: es uno de los Sistemas de Información Geográfica más antiguos y conocidos. Es una herramienta compleja y multifuncional, y muchos investigadores planetarios han escrito complementos o módulos para ArcGIS que pueden ser utilizados en la ciencia planetaria (por ejemplo, el conteo de cráteres).
- GRASS: es un GIS de código abierto con una serie de poderosos módulos para el análisis de datos.
- QGIS: es otro Sistema de Información Geográfica de código abierto que es altamente funcional y tiene muchas capacidades como las que tiene ArcGIS.
- JMARS: es un programa de planificación y análisis de Java para teledetección. Es un SIG que ha sido construido para conjuntos de datos planetarios.
- PlanetServer: es un enfoque para el análisis de datos, que mantiene conjuntos de datos en un servidor central, pero permite a los usuarios consultar y manipular los datos a través de una interfaz web.

Lenguajes de programación:

Algunas veces los datos deben ser procesados o analizados de una manera que ninguna herramienta existente puede ayudar y los investigadores deben crear su propio algoritmo o herramienta. Otras veces, pueden necesitar secuenciar una serie de acciones que son relevantes para su problema. En estos casos, ser capaz de escribir algunos programas puede ser de gran ayuda.

Se pueden usar Shell scripts simples para esto o lenguajes ligeramente superiores como Perl o Python que permiten operaciones más complejas, y ambos tienen una serie de módulos adicionales que permiten trabajos científicos y numéricos bastante complejos.

3.2.3.3. Representación cartográfica

La realización exitosa del flujo de trabajo en cartografía planetaria da como resultado la cartografía de cuerpos celestes, tanto mapas impresos como mapas online y geoportales.

El problema básico a la hora de realizar la cartografía es tomar la decisión de cómo presentar la información. La elección depende de la superficie de referencia matemática, la exactitud de los datos de la fuente, el área y objeto de estudio cartográfico, y el propósito y uso del producto final. Teniendo en cuenta esos factores, se elige el tipo de trabajo cartográfico (globo, mapa, atlas, etc.), la definición del sistema de coordenadas, la escala y los métodos de representación cartográfica.

En cuanto a las proyecciones cartográficas, se usan tanto las proyecciones más tradicionales como las modernas para el desarrollo de mapas planetarios. Las formas de algunos cuerpos celestes son similares a esferas o elipsoides, por lo que pueden ser representadas usando las mismas proyecciones que se usan para representar la Tierra.

Antes de la aplicación de una proyección cartográfica es necesario definir la superficie matemática de referencia y el conjunto de coordenadas sobre esa superficie. En el caso de objetos como la Luna o Marte, cuya forma se asemeja a un elipsoide, sus superficies de referencia se han determinado con bastante precisión. Para objetos rocosos, el elipsoide se define por los ejes de rotación y el diámetro medio de la superficie.

Los mapas planetarios, generalmente, tienen al menos tres capas de información:

- La imagen base, que puede ser un mosaico fotográfico, relieve sombreado, etc.
- La cuadrícula cartográfica.
- Los nombres de los objetos característicos e importantes.

La disponibilidad de fuentes de datos nuevas y más precisas provoca un aumento de los estudios multitemáticos. Un mapa temático de un cuerpo celeste puede ser la estructura geomorfológica, el campo de gravedad, el relieve, los lugares donde se posaron las misiones espaciales, etc.

También, con el desarrollo de las tecnologías de la información han surgido geoportales planetarios, con el objetivo de proporcionar acceso a los datos espaciales de los cuerpos celestes estudiados, que contienen diversas capas de información.

3.2.4. Nuevos retos de la cartografía planetaria

Hoy en día, el desarrollo de la cartografía planetaria depende de las decisiones políticas y del desarrollo tecnológico, que son difíciles de predecir, pero varios desafíos técnicos y organizacionales son relativamente fáciles de identificar.

Desafíos técnicos:

- Automatización. Reducir la necesidad de interacción experta en el procesamiento de datos reduce los costos y permite proyectos más ambiciosos, siempre que se pueda hacer sin sacrificar la precisión y exactitud.
- Integración. Esto es necesario a todos los niveles, desde flujos de trabajo más ágiles para tareas como control geodésico dentro de un paquete software determinado, una comunicación más fluida de datos entre software planetario dedicado y otras aplicaciones, etc.
- Nuevos objetivos. Muchos cuerpos pequeños son de forma irregular, por lo que las proyecciones y los enfoques de procesamiento de la cartografía clásica no se pueden aplicar.
- Nuevos instrumentos. La altimetría láser o el sondeo mediante radar han estado en uso por más de una década. El futuro traerá nuevos instrumentos que requieran técnicas de procesamiento más avanzadas.

Desafíos organizacionales:

La reciente reestructuración de los programas de investigación de la NASA ha eliminado el Programa de Geología Planetaria y Geofísica que proporcionó un gran

apoyo para el procesamiento de datos espaciales durante décadas. Afortunadamente, la NASA ha expresado su comprensión de la necesidad de una infraestructura espacial y cartográfica, y su apoyo en el programa planetario.

Desafíos:

- Es necesario que los expertos en la investigación planetaria den una definición amplia de lo que significa la cartografía y las muchas formas en que contribuye a su investigación.
- Financiación. Es improbable que se produzcan aumentos significativos en la financiación, pero la tendencia reciente en la que los presupuestos decrecientes se dedican a mantener las capacidades teóricas mientras se abandona cada vez más el procesamiento de datos, debe ser revertida.
- Priorización. Dado el presupuesto finito, las prioridades para el desarrollo del procesamiento de datos espaciales debe ser evaluado continuamente.
- Cooperación internacional. La ciencia planetaria es una actividad cada vez más internacional, y los conjuntos de datos no solo deben ser compartidos, sino que deben ser procesados y analizados conjuntamente para maximizar el retorno científico.

3.3. Datos geográficos de la Luna disponibles en la red

3.3.1. Misiones cuyos datos son accesibles desde la red

La Luna es nuestro vecino cósmico más cercano y los humanos han estado explorando su superficie desde el desarrollo de los primeros telescopios.

Los primeros vehículos de exploración lunar de los años cincuenta fueron pioneros pero la tecnología aeroespacial se desarrolló tan rápidamente que apenas una década después se produjeron los históricos pasos de Neil Armstrong en la superficie de la Luna.

Desde entonces se han enviado numerosas misiones por parte de diferentes organismos de diferentes naciones, con el objetivo de responder a un gran número de preguntas sobre el origen y evolución de la Luna, su geología, su estructura

química y física, etc., para poder comprender mejor la historia de otros cuerpos del Sistema Solar.

Muchas de estas misiones han recabado un gran número de información, en muchos casos de interés para cumplir el objetivo de este trabajo, que han puesto a disposición del público a través de sus páginas web o plataformas en línea creadas para este propósito. Algunas de las misiones, cuya información geográfica de la Luna está disponible en la red, son las siguientes:

- **Clementine:** fue lanzada el 25 de enero de 1994 por la NASA. En el transcurso de 71 días en órbita captó imágenes de los 38 millones de kilómetros cuadrados en once longitudes de onda diferentes, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano. Además, la sonda tomó 620.000 imágenes de alta resolución y registró la topografía lunar con equipos láser. Se puede ampliar la información sobre esta misión en su página web (<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/clementine.html>) y descargar los datos obtenidos en plataformas como PDS Geosciences Node Lunar Orbital Data Explorer o MAP2 del USGS, que se detallarán más abajo.
- **Kaguya:** fue lanzada en septiembre de 2007 por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA). Sus objetivos principales fueron comprender el origen y evolución de la Luna, también obtener información sobre su composición, mineralogía, geografía, superficie, campo magnético y campo de gravedad. La misión finalizó en junio de 2009. Se puede obtener más información sobre esta misión en su web (http://www.kaguya.jaxa.jp/index_e.htm) y descargar sus datos en PDS Geosciences Node o MAP2.
- **Chandrayaan-1:** fue la primera misión India a la Luna lanzada el 22 de octubre de 2008. La sonda orbitó alrededor de la Luna a una altura de 100 kilómetros de la superficie para obtener información sobre la composición química, mineralógica y geológica de la Luna. Llevaba consigo once instrumentos científicos construidos por el Indian Space Research Organisation (ISRO) y por organismos de Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Suecia y Bulgaria. Se puede obtener más información de esta

misión en la web del proyecto (<http://www.isro.gov.in/Spacecraft/chandrayaan-1>) y descargar los datos obtenidos en PDS Geosciences Node o MAP2.

- **LRO:** el 18 de junio de 2009 fue lanzada la sonda Lunar Reconnaissance Orbiter. Los instrumentos LRO obtienen datos globales, como mapas de temperaturas, una cuadrícula geodésica global, imágenes en color de alta resolución, etc. Con un amplio conjunto de datos enfocados en apoyar la presencia humana en el Sistema Solar, el LRO ayuda a identificar lugares con alto valor científico, terrenos favorables y el ambiente necesario para futuras misiones lunares tanto tripuladas como no tripuladas. El satélite estudia la topografía general de la superficie lunar mediante técnicas láser y obtiene imágenes de alta resolución de lugares de interés. Se puede obtener más información sobre esta misión en su dirección web (<https://lunar.gsfc.nasa.gov/>) y descargar los datos recabados por ella en PDS Geosciences Node o MAP2. Dos instrumentos del LRO son de especial interés para este trabajo, que son:
 - LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter): proporciona un modelo topográfico lunar global y un sistema de referencia necesario para seleccionar lugares de alunizaje para futuras misiones. Más información y productos disponibles en su página web (<https://lola.gsfc.nasa.gov/>).
 - LROC (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera): es un sistema de tres cámaras montadas en el LRO que capturan imágenes en blanco y negro de alta resolución e imágenes multi-espectrales de resolución moderada de la superficie lunar. Consta de dos cámaras de ángulo estrecho (NAC) diseñadas para proporcionar imágenes pancromáticas de 0,5 metros/píxel de resolución y una cámara gran angular (WAC) que proporciona imágenes con una resolución de 100 metros/píxel. Más información sobre este instrumento y los productos que proporciona en su página web (<http://www.lroc.asu.edu/>).

A partir de aquí se describen algunas de las plataformas en línea que facilitan la descarga de los datos provenientes de las diferentes misiones descritas anteriormente, y que de donde se han obtenido los datos para la realización de este TFG.

3.3.2. Organismos y plataformas en línea para descarga de datos planetarios

3.3.2.1. Astrogeology Science Center

El Astrogeology Science Center dependiente del United States Geological Survey (USGS) es un recurso nacional para la integración de la geociencia planetaria, la cartografía y la teledetección. Sirve a la comunidad científica planetaria internacional y al público en general, de nuevos conocimientos de nuestro Sistema Solar, desarrollando las siguientes funciones:

- Realizar investigación innovadora y fundamental en los campos de la cartografía planetaria, la geociencia y la teledetección.
- Desarrollo de software y técnicas de vanguardia para el análisis científico y cartográfico de datos de teledetección planetaria.
- Participación en la planificación y operación colaborativa de misiones de exploración espacial.
- Producción de productos cartográficos precisos, reconocidos internacionalmente como de referencia.
- Establecimiento de estándares que fomente la cooperación internacional.
- Archivar y distribuir datos y productos para un acceso eficiente a través de la tecnología moderna.

La misión del Astrogeology Science Center incluye la producción de mapas planetarios y productos cartográficos que revelan la topografía, geología, mosaicos de imágenes, etc., todos puestos a disposición de la comunidad científica internacional.

El USGS realiza investigaciones que incluyen estudios sobre geología, vulcanismo, astrobiología, flujo de hielo y agua, envejecimiento de cráteres, etc. El enfoque principal del equipo es explicar los procesos geológicos y geofísicos en los

planetas rocosos y los satélites. Tal investigación conduce a una mejor comprensión del carácter de nuestros planetas vecinos, los orígenes del Sistema Solar, y una mejor comprensión de nuestro planeta.

El USGS ha trabajado para la NASA y otras agencias espaciales para dirigir investigaciones científicas, seleccionar lugares de aterrizaje, crear mapas geológicos y productos cartográficos en todo nuestro Sistema Solar. Algunas de las misiones que ha apoyado el USGS, y que son de especial interés para este trabajo son:

- Misiones Apolo. El USGS estuvo involucrado en el Programa Apolo, realizando mapas de alta resolución de las zonas de alunizaje. A partir de 1963 también desempeñó un papel importante en el entrenamiento de astronautas destinados a explorar la superficie lunar. Harrison H. “Jack” Schmitt, geólogo del USGS y astronauta del Apolo 17, sigue siendo el único geólogo que ha pisado la Luna. Después de la misión, el USGS creó una serie de productos y mapas para resaltar las exploraciones de los astronautas del Apolo.
- Clementine. Los cartógrafos del USGS utilizaron los datos e imágenes de la nave Clementine para cartografiar la Luna con una resolución de 125-250 metros/píxel. A partir de esos datos fue posible estudiar la mineralogía de toda la Luna, un hecho sin precedentes en la historia de la exploración planetaria. Además de cámaras multispectrales, la nave Clementine llevaba un altímetro laser, que hizo posible el primer mapa topográfico lunar uniforme.
- Lunar orbiter. Cinco misiones Lunar Orbiter fueron lanzadas entre 1966 y 1967 para estudiar la Luna. Las tres primeras misiones se dedicaron a estudiar posibles zonas de alunizaje. Las misiones cuarta y quinta estaban destinadas a objetivos científicos más amplios.
- Lunar Reconnaissance Orbiter. Esta misión está produciendo mapas globales de alta resolución de la Luna y también está buscando fuentes de agua que puedan encontrarse en cráteres polares permanentemente sombreados. El proyecto LMMP maneja un conjunto de productos (mosaico de imágenes, modelos digitales de elevaciones, mapas de pendientes y mapas de

gravedad) que apoyan la investigación lunar, la exploración y las actividades de divulgación.

La página web del Astrogeology Science Center (<https://astrogeology.usgs.gov/>) proporciona estas diferentes herramientas y productos:

- Astropedia: es un catálogo de datos planetarios. Es aquí de donde se han descargado algunos de los conjuntos de datos utilizados para cumplir los objetivos de este trabajo (ver Figura 3.2).
- Gazetteer of Planetary Nomenclature: diccionario de nomenclatura planetaria.
- Planetary Geologic Mapping Program: programa de cartografía geológica planetaria que realiza mapas geológicos de alta calidad de los cuerpos celestes.
- Planetary Image Locator Tool: herramienta de localización de imágenes planetarias, acceso al mayor archivo de imágenes espaciales brutas de la NASA.
- Planetary Maps Index: índice de mapas planetarios.
- Integrated Software for Imagers and Spectrometers (ISIS): paquete de software de procesamiento de imágenes digitales.
- Map a Planet 2: una de las principales herramientas usadas en este trabajo. Esta herramienta permite a los usuarios seleccionar mosaicos de imágenes globales, que pueden ser proyectados, recortados en extensión y que pueden ser convertidas al formato deseado por el usuario.
- Projection on the Web (POW): los archivos PDS se almacenan en crudo o en formato de datos de ingeniería (EDR). Antes de que sean verdaderamente útiles para el análisis, estas imágenes deben ser calibradas radiométricamente y proyectadas en alguna superficie de referencia. Las imágenes que proporciona POW pueden usarse para cartografía geológica, para su análisis en un SIG, etc.

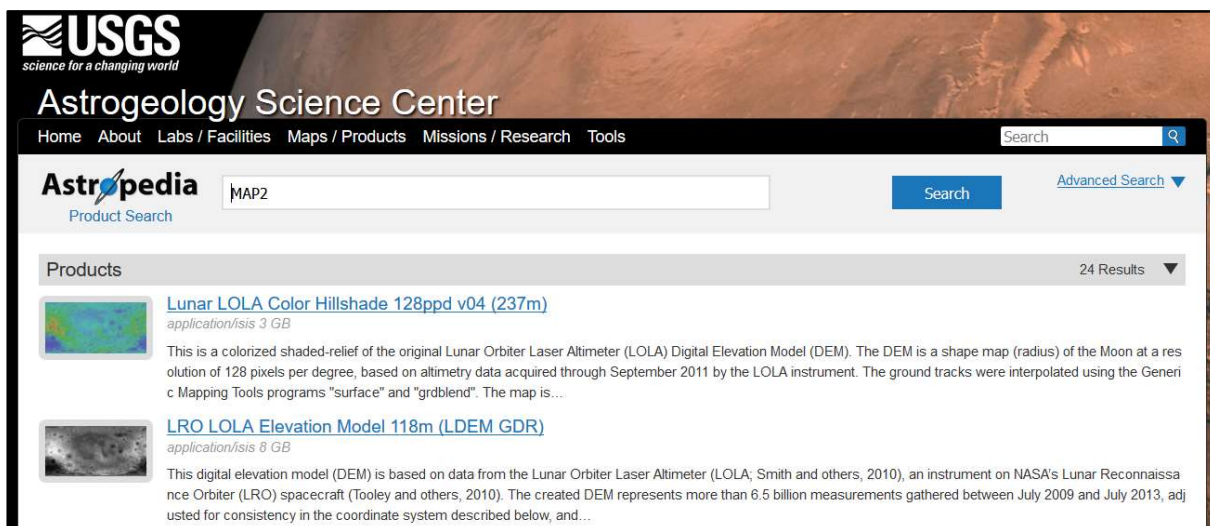


Figura 3.2. Portal de Astropedia

Como herramienta fundamental de este trabajo, se describe Map a Planet 2 con más detalle.

Tal y como se ha descrito anteriormente, esta herramienta permite a los usuarios seleccionar mosaicos de imágenes globales y otros productos como modelos digitales de elevaciones, en el formato que más le interese para realizar sus investigaciones.

Tiene las siguientes herramientas integradas:

- ISIS 3: paquete de software de procesamiento de imágenes.
- GDAL: convierte el formato PDS al formato deseado (GeoJpeg2000, Jpeg, PNG).
- PDS Annex (Astropedia Data Portal): ayuda a catalogar los productos para buscar, descargar y manejar las tareas de procesamiento.

Para encontrar y descargar la información necesaria se deben seguir los siguientes pasos:

- Solicitar una cuenta gratuita.
- Buscar en PDS Annex (Astropedia Data Portal).
- Seleccionar el cuerpo celeste deseado.
- Seleccionar el producto deseado.

- Descargar o procesar.
- Seleccionar las opciones de procesamiento.
- Una vez hecho esto, el usuario recibirá una notificación por correo electrónico y podrá acceder a los productos generados a través de MAP2. Estos productos incluyen:
 - Un archivo .zip con todos los archivos creados.
 - Enlaces de descarga individuales para los productos de imagen, encabezados GIS y otros archivos de datos de soporte.
 - Un documento de texto que: enumera los comandos ISIS3/GDAL que se utilizaron para crear los productos e identifica los errores ocurridos si es que los hay.

Esta herramienta funciona de la siguiente manera (ver Figura 3.3):

- Interfaz web para seleccionar los archivos y las opciones de procesamiento.
- Servidor de base de datos para rastrear el estado de los trabajos de procesamiento.
- Procesamiento clúster con 123 CPUs.
- Nodo PDS imaging con 4 Gb de acceso a la red de 111 Tb de datos.

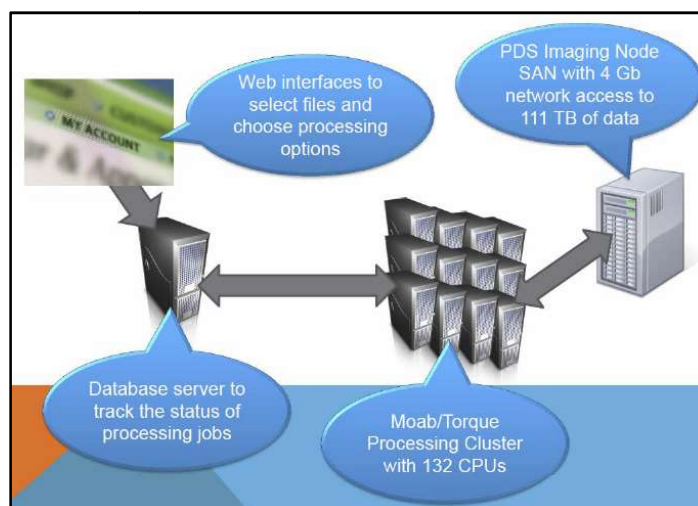


Figura 3.3. Funcionamiento de MAP2

Los productos se crean de la siguiente manera (ver Figura 3.4):

- Solicitud de procesamiento por el usuario.
- Documento XML con las opciones del usuario.

- Documento XML con las opciones del instrumento.
- Procesamiento clúster usando ISIS3/GDAL genera los productos.

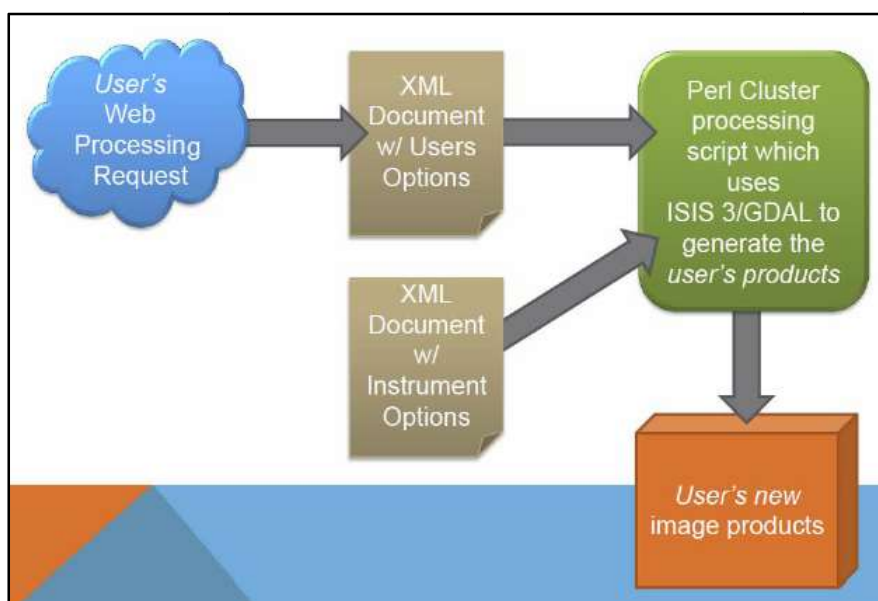


Figura 3.4. Creación de productos en MAP2

En Astropedia Data Portal hay datos de diversos cuerpos celestes como son Mercurio, Venus, la Luna, Marte y su luna Phobos, las lunas de Jupiter, Europa, Ganimedes e Io, las lunas de Saturno, Dione, Encelado, Titan, Tetis, Japeto y Rea, y de cuerpos pequeños como Ceres y Vesta.

De todos ellos nos centramos en los referentes a la Luna. En esta plataforma existen datos procedentes de las sondas LRO, Lunar Orbiter, Clementine y Kaguya. Los principales productos que podemos encontrar son Modelos Digitales de Elevaciones (MDE), Modelos Digitales del Terreno (MDT) y mosaicos de imágenes. Un total de 24 productos diferentes, cada uno con sus metadatos a disposición del usuario.

Uno de los productos destacados es el modelo digital de elevaciones proporcionado por la sonda LRO mediante su instrumento LOLA con una resolución de 118 metros/píxel (ver Figura 3.5).

Home About Labs / Facilities Maps / Products Missions / Research Tools

Astropedia Product Details

Annex NASA PDS and Derived Products

Download

[Sample \(jpg\) 1024px wide](#)

[Original \(tif*\) 8 GB](#)

Back LRO LOLA Elevation Model 118m (LDEM GDR)

This digital elevation model (DEM) is based on data from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA; Smith and others, 2010), an instrument on NASA's Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) spacecraft (Tooley and others, 2010). The created DEM represents more than 6.5 billion measurements gathered between July 2009 and July 2013, adjusted for consistency in the coordinate system described below, and then converted to lunar radii (Mazarico and others, 2012). Elevations were computed by subtracting the lunar reference radius of 1737.4 km (Archinal and others, 2011; LRO Project and LGCWG, 2008) from the surface radius measurements. Thus elevation values are the distance above or below the reference sphere. The average accuracy of each point after crossover correction is better than 20 meters in horizontal position and ~1 meter in radius (Mazarico and others, 2012). The measurements were converted into a digital elevation model (DEM; Neumann and others, 2010) using Generic Mapping Tools software (Wessel and Smith, 1998), with a resolution of 256 pixels per degree. In projection, the pixels are 118 meters in size at the equator. Gaps between tracks of 1–2 km are common, and some gaps of up to 4 km occur near the equator. DEM points located in these gaps in LOLA data were filled by interpolation (Smith and others, 2011).

Project, clip, convert format (e.g. PDS, GeoTIFF, Jpeg) and download this product with Map a Planet requires account

[CLICK HERE](#) for login advice for Chrome users:

Process

Ancillary Products

[LRO_LOLA_DEM_NPolar875_10m.tif* \(tif\) 260 MB](#)

[LRO_LOLA_DEM_SPolar875_10m.tif \(tif\) 278 MB](#)

[LRO_LOLA_DEM_NPole75_30m.tif \(tif\) 2 GB](#)

Figura 3.5. Producto disponible en MAP2

3.3.2.2. Lunar Planetary Institute (LPI)

Fue descrito por el presidente Lyndon B. Johnson en 1968 como “un centro de investigación donde los científicos que trabajan en las ciencias del espacio cooperan para ampliar el conocimiento del universo”. Las funciones principales del Instituto son:

- Investigaciones científicas: el Instituto realiza investigaciones sobre la formación, evolución y estado actual de la Luna, planetas, cometas, asteroides, satélites planetarios, polvo cósmico, y nuestro Sistema Solar en conjunto, a través del análisis de datos y muestras obtenidas a través de la larga historia de misiones y exploración de la NASA.
- Servicios a la NASA y a la comunidad científica planetaria: el Instituto coordina reuniones científicas sobre temas lunares y planetarios, y difunde información científica a través de revistas técnicas y conferencias, incluyendo una base de datos de más de 20.000 presentaciones hechas por científicos en reuniones del LPI. El Instituto también cuenta con una extensa colección de datos lunares y planetarios que es accesible en línea.
- Educación y divulgación científica: el Instituto desarrolla programas de educación y difusión pública que involucran a las familias, los educadores y

los estudiantes en la ciencia espacial y mejoran la apreciación pública de la ciencia lunar y planetaria.

El LPI se estableció durante las misiones Apolo para fomentar la colaboración internacional y para servir como repositorio para la información recopilada durante los primeros años del programa espacial.

La página web del Instituto (<http://www.lpi.usra.edu/>) pone a disposición del usuario información sobre nuestro satélite, que es de gran valor para el desarrollo del presente trabajo (ver Figura 3.6). Entre esta información destaca:

- Información sobre las misiones que han explorado la Luna.
- Documentos acerca de las misiones Apolo.
- Imágenes y mapas lunares.
- Estudios de las zonas de alunizaje.

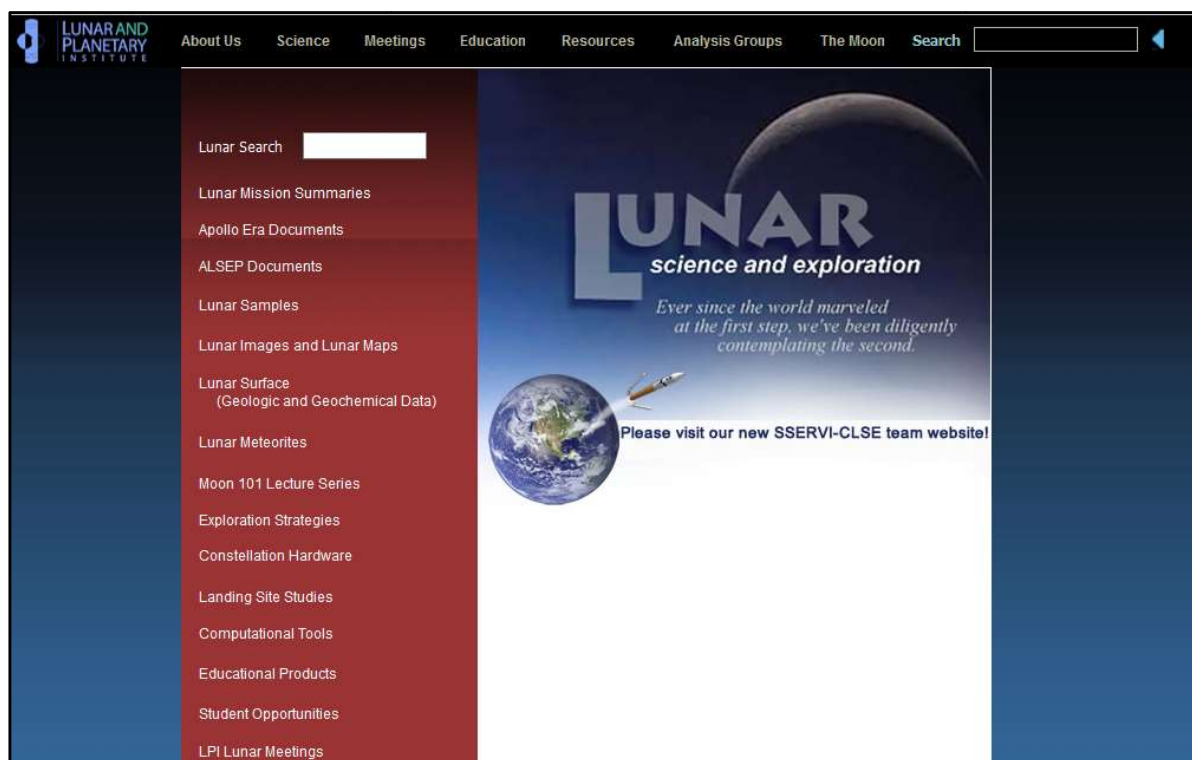


Figura 3.6. Sección sobre la Luna en la web del LPI

De estos apartados destaca el de imágenes y mapas lunares, al tratarse de información geográfica de la Luna, que es lo que ocupa este apartado. Esta sección contiene imágenes digitales de la Luna tomadas desde la Tierra con telescopios, de

las naves espaciales que orbitan o han orbitado la Luna, de los astronautas que la visitaron y sus equipos. Contiene la siguiente información accesible al usuario:

- Atlas de muestras lunares: imágenes de 195 canales lunares de la cara visible y la cara oculta de la Luna. Este atlas proporciona una interfaz con la cual se pueden observar todos los canales en contexto geográfico con los mosaicos de la Cámara Gran Angular (WAC) de LROC.
- Imágenes panorámicas de las misiones Apolo: imágenes que los astronautas del Apolo tomaron mientras exploraban la superficie de la Luna.
- Sobrevuelos de la superficie lunar: serie de películas digitales que permiten a los espectadores volar sobre la superficie lunar.
- Proyecto de cartografía Clementine: herramienta en línea para usuarios que quieran generar mapas de la superficie lunar y su composición utilizando datos de la misión Clementine.
- Fotogalería del orbitador lunar: extensa colección de más de 2.600 fotografías de alta y moderada resolución tomadas durante las cinco misiones Lunar Orbiter. Estas imágenes fueron tomadas entre 1966 y 1967 para examinar posibles zonas de alunizaje y producir muchos de los actuales mapas geológicos de la Luna.
- Atlas fotográfico de la Luna: considerado el manual de referencia definitivo para la cobertura fotográfica de la Luna.
- Atlas lunar consolidado: colección de las mejores imágenes de la Luna.
- Atlas de imágenes del Apolo: casi 25.000 imágenes lunares, tanto desde la órbita como desde la superficie de la Luna, así como fotografías de la Tierra, de los astronautas y del hardware de la misión.
- Catalogo de mapas lunares: colección de mapas de la Luna del relieve topográfico en una variedad de escalas.
- Fotografías del Ranger lunar: imágenes de las misiones Ranger 7, Ranger 8 y Ranger 9.
- Base de datos del alunizaje en SouthPole-Aitken: proporciona mapas base y diversas capas de características relevantes de la cuenca Aitken para utilizar en el software ArcGIS.

3.3.2.3. PDS Geoscience

El Geoscience Node of NASA’s Planetary System (PDS) archiva y distribuye datos digitales relacionados con el estudio de las superficies e interiores de los cuerpos planetarios rocosos. Trabaja directamente con las misiones de la NASA para ayudar a generar archivos de datos permanentes y bien documentados. Todos sus archivos están en línea y están disponibles al público para su descarga gratuita.

Uno de los servicios que ofrece es el Orbital Data Explorer (ODE), que proporciona herramientas de búsqueda, visualización y descarga de datos agrupados a través de instrumentos, misiones y nodos. El referente a nuestro satélite es el PDS Geoscience Node Lunar Orbital Data Explorer que ofrece datos de las misiones LRO, Clementine, Lunar Prospector, Chandrayaan-1 (ver Figura 3.7).

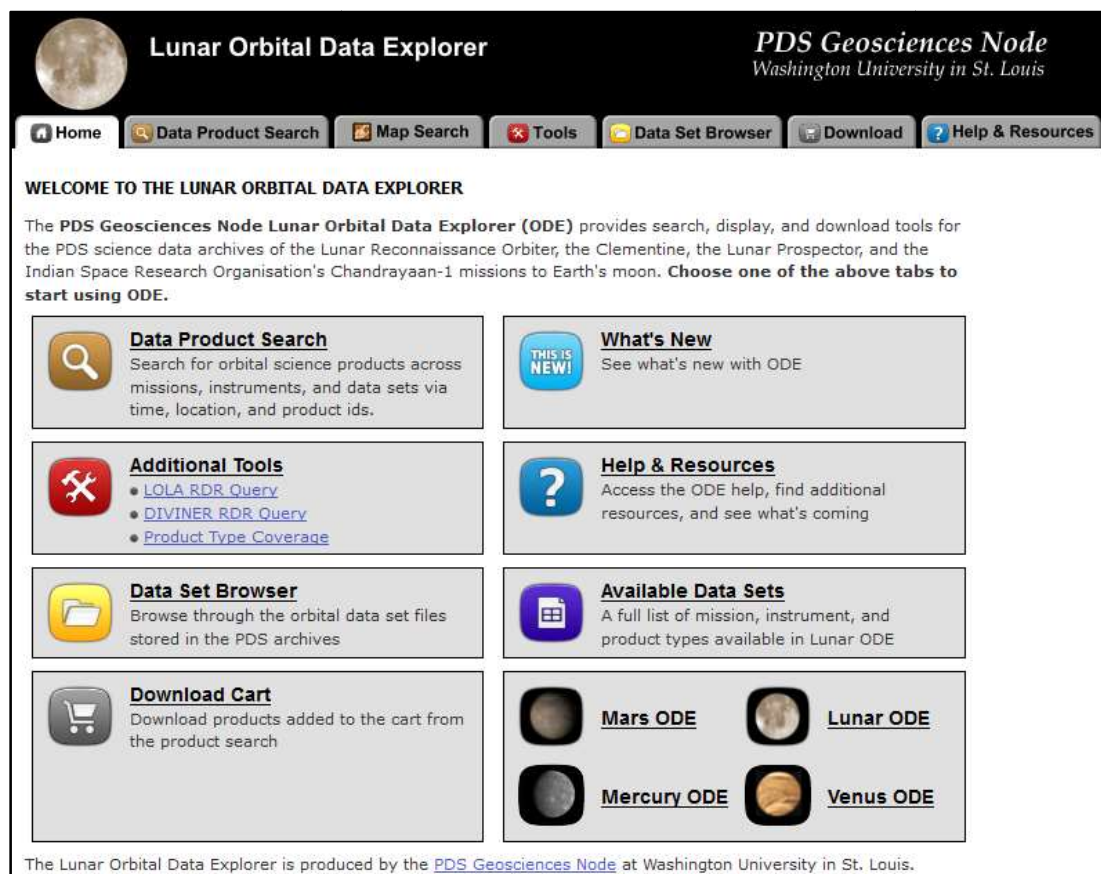


Figura 3.7. Lunar Orbital Data Explorer

3.4. Misiones del Programa Apolo

El 4 de octubre de 1957, la Unión Soviética lanzó el primer satélite artificial de la historia, llamado “Sputnik” (ver Figura 3.8), así dio comienzo a la carrera espacial entre la URSS y los Estados Unidos. Una carrera espacial que supuso el esfuerzo paralelo entre ambos países de explorar el espacio exterior con satélites artificiales, enviar seres humanos al espacio y llegar a la Luna. La carrera espacial se convirtió en una parte importante de la rivalidad cultural y tecnológica entre estos países en el marco de la Guerra Fría. Estados Unidos quedó impactado por este lanzamiento soviético, ya que ellos esperaban alcanzar este hito tecnológico a través del proyecto Vanguard, el cual fue un fracaso. El 31 de enero de 1958, EEUU lanzó su primer satélite llamado “Explorer”, que fue suministrado por el Jet Propulsion Laboratory (JPL) del Instituto Tecnológico de California, en Pasadena.

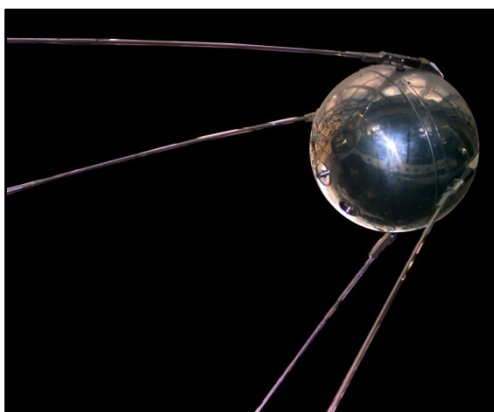


Figura 3.8. Satélite Sputnik I (Imagen de: www.nasa.gov)

Aunque tras el lanzamiento del Explorer se había restaurado el honor nacional, el Departamento de Defensa estaba preocupado ya que el cohete soviético era mucho más poderoso que el suyo. El 2 de abril una orden ejecutiva estableció la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Seis semanas después de que el Explorer fuera lanzado, se comenzaron a escribir las especificaciones aerodinámicas de un satélite recuperable. En septiembre de 1958, se acordó el desarrollo de un satélite tripulado. Se creó un grupo de trabajo para estudiar cómo lograr un vuelo orbital y la recuperación exitosa de un satélite tripulado antes de que la Unión Soviética mandara un hombre al espacio.

El 18 de agosto se propuso que el primer proyecto importante que se investigaría debía ser una nave de segunda generación con capacidad para tres hombres, espacio libre y maniobrabilidad atmosférica, dispositivos avanzados de abordaje, potencial para un regreso lunar y técnicas avanzadas de recuperación. En enero de 1960 se sugirió que este proyecto se denominara Apolo.

El 12 de abril de 1961, Yuri Gagarin realizó con éxito la primera misión orbital tripulada de la historia para la Unión Soviética (ver Figura 3.9). El presidente estadounidense John Kennedy dijo “nadie está más cansado que yo de ver a EEUU por detrás de los soviéticos en el espacio”. Kennedy pidió al Consejo Espacial que sugiriera una estrategia a largo plazo, “si podemos llegar a la Luna antes que los rusos, entonces debemos hacerlo”. Otras naciones tendrían tendencia a alinearse con otro país que será líder mundial. Se debía hacer el esfuerzo en ese momento, ya que las ganancias tecnológicas, así como las recompensas internacionales eran pasos para ganar liderazgo en el mundo. No solo era un logro con valor propagandístico, sino que era esencial para el progreso de la nación en todos los sentidos.



Figura 3.9. Yuri Gagarin (Imagen de: www.nasa.gov)

Se quiso detallar un enfoque factible y completo para un alunizaje “temprano”. La fecha en la que se pensó fue 1967 debido a que se pensó que los soviéticos podrían hacer un alunizaje ese año con el fin de conmemorar el 50 aniversario de la revolución bolchevique.

El 5 de mayo de 1961, después de la primera misión tripulada Mercury, cuyo objetivo fue el sobrevuelo tripulado de nuestro satélite para localizar una zona apropiada con vistas a un eventual alunizaje con astronautas, el grupo de trabajo espacial terminó el proyecto Apolo. El 25 de mayo, Kennedy pronunció un discurso ante el Congreso sobre las necesidades nacionales urgentes (ver Figura 3.10). En vista de los logros espaciales soviéticos, Kennedy proclamó que la nación debía comprometerse en alcanzar el objetivo, antes de que terminara la década, de llevar al hombre a la Luna, llegando a la conclusión de que el espacio era el escenario de la política de las superpotencias por el liderazgo mundial.



Figura 3.10. John Kennedy en el discurso el 25 de mayo de 1961 (Imagen de: www.nasa.gov)

A partir de ese momento se empezó a desarrollar el Programa Apolo que terminaría siendo uno de los triunfos más importantes de la tecnología moderna. Seis misiones lograron posarse sobre la superficie lunar (Apolo 11, 12, 14, 15, 16 y 17) con un solo fracaso, la misión Apolo 13 sufrió un fallo que le obligó a regresar antes de alunizar.

Previo a las misiones con descenso proyectado sobre la superficie lunar, se probaron los sistemas de vuelo en varios lanzamientos automáticos (Apolo 2, 3, 4, 5 y 6), y después hubo dos pruebas tripuladas en órbita terrestre (Apolo 7 y 9), y dos misiones solo orbitales, sin alunizaje, a la Luna (Apolo 8 y 10).

El 30 de agosto de 1965, se anunció el emblema para representar el Programa Apolo. Tenía una letra "A" sobre un cielo negro que representaba la constelación de Orión, la Tierra y la Luna, y arcos de trayectoria entre la Tierra y la Luna. Los

astronautas estaban representados por las tres estrellas del cinturón de Orión, que descansaban a lo largo de la barra de la letra “A” (ver Figura 3.11).



Figura 3.11. Emblema del Programa Apolo (Imagen de: www.nasa.gov)

Descripción de la nave Apolo

El modulo lunar Apolo fue la primera nave diseñada para volar en el vacío sin ninguna capacidad aerodinámica. El modulo lunar estaba unido al modulo de mando y al modulo de servicio (ver Figura 3.12), y se desacoplaba de estos en la órbita lunar para comenzar su descenso a la superficie lunar con dos astronautas a bordo. Tenía una patas muy frágiles de manera que no podían cargar el peso del modulo en gravedad terrestre, pero si en la lunar (aproximadamente un sexto de la gravedad en la Tierra) (ver Figura 3.13). Finalizada la misión en la superficie lunar, la etapa superior del modulo despegaba para volverse a unir a los módulos de mando y servicio en órbita lunar.

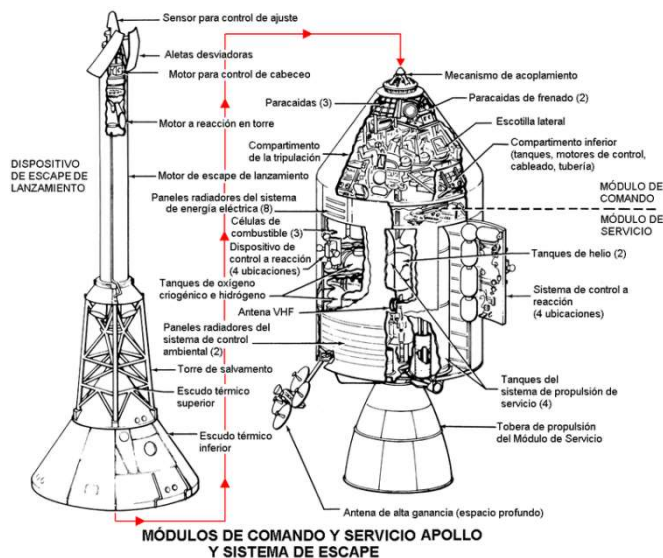


Figura 3.12. Módulos de comando y servicio, y sistema de escape (Imagen de: wikipedia)

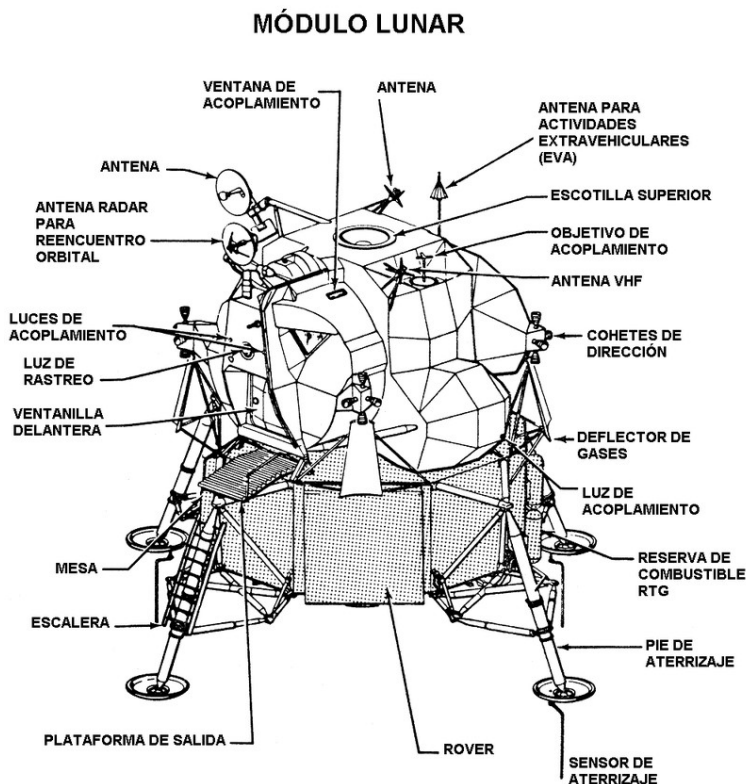


Figura 3.13. Módulo lunar (Imagen de: wikipedia)

El modulo de mando tenía capacidad para tres astronautas y estaba acoplado al modulo de servicio que contenía el motor del sistema de propulsión que ubicaba la nave dentro y fuera de la órbita lunar.

Saturno V

Para transportar a las naves Apolo a su destino fue necesaria la construcción del cohete más grande construido por la NASA, el Saturno V, que medía 110,64 metros de altura. Lleno de combustible tenía un peso de 2.700 toneladas y constaba de tres etapas: S-IC, S-II y S-IVB. La última etapa era la encargada de enviar la nave Apolo fuera de la órbita terrestre dirección a la Luna (ver Figura 3.14).



Figura 3.14. Cohete de lanzamiento Saturno V (Imagen de: www.nasa.gov)

Apolo 1

Tras varias pruebas del cohete de lanzamiento Saturno IB (AS-201, AS-203, AS-202), el modelo anterior al Saturno V, todo estaba listo para dar comienzo a la misión Apolo 1, programada para ser la primera misión tripulada del programa Apolo. Sus objetivos eran realizar pruebas del módulo de mando y servicio en una órbita terrestre baja. Lamentablemente, esto no llegó a ocurrir debido a que el 27 de enero de 1967, poco antes del lanzamiento del Apolo 1, durante una prueba de los sistemas del módulo de comando, con los astronautas en su interior, se produjo un incendio dentro del mismo que se cobró, antes de que pudiera llevarse a cabo el más mínimo intento de rescate, la vida de los astronautas Virgil "Guss" Grissom, Edward White II y Roger Chaffee (ver Figura 3.16).



Figura 3.15.
Emblema Apolo 1
(Imagen de:
www.nasa.gov)



Figura 3.16. Tripulación Apolo 1 (Imagen de: www.nasa.gov)

Una comisión investigadora determinó que la tragedia se había originado como consecuencia del oxígeno puro al 100% que entró en combustión con una chispa provocada por un cortocircuito en uno de los paneles de control de la nave. Aunque la fuente de ignición no pudo ser determinada de manera concluyente, el desastre se atribuyó a una gran cantidad de defectos de diseño y construcción del módulo de comando del Apolo.

Los vuelos tripulados Apolo fueron suspendidos por 20 meses hasta que se implementaron importantes modificaciones en el diseño, materiales y procedimientos.

Apolo 4

El Apolo 4 (AS-501) fue un vuelo de prueba sin tripulación, que fue lanzado el 9 de noviembre de 1967. Fue el primer vuelo del cohete de lanzamiento Saturno V y sus objetivos principales fueron demostrar la integridad estructural del vehículo de lanzamiento, y verificar la suficiencia del blindaje térmico de la nave Apolo para la entrada en la atmosfera terrestre en condiciones de vuelta lunares. Estos objetivos se lograron satisfactoriamente.

Apolo 5

El Apolo 5 fue lanzado el 22 de enero de 1968 y su principal objetivo fue probar el módulo lunar (LM-1). El rendimiento general del módulo lunar cumplió con todos los requisitos para el vuelo orbital tripulado y se canceló el segundo vuelo planeado para seguir probándolo.

Apolo 6

Fue lanzado el 4 de abril de 1968 y el módulo de comando y servicio (CM) fue recuperado 10 horas después del lanzamiento. Fue la última misión no tripulada del programa Apolo.

Los objetivos fueron demostrar la capacidad del cohete Saturno V de realizar una inyección translunar (maniobra de propulsión utilizada para colocar una nave espacial en una trayectoria que conduciría a la Luna) con una carga simulada de aproximadamente el 80% de una nave espacial Apolo completa.

Un fenómeno conocido como oscilación pogo (oscilación violenta de los motores del cohete debido a la combustión inestable del propelente) dañó algunos motores de la segunda y tercera etapa.

A pesar de este fallo, el vuelo le dio a la NASA la suficiente confianza para utilizar el Saturno V para lanzamientos tripulados.

Apolo 7

Veintiún meses después del incendio del Apolo 1, todo estaba preparado para comenzar la fase tripulada del Programa Apolo. Los objetivos principales de la misión consistían en demostrar el funcionamiento del módulo de comando y servicio, y el rendimiento de la tripulación, del vehículo espacial y de las instalaciones de apoyo a la misión.

Fue lanzado el 11 de octubre de 1968 y los miembros de la tripulación fueron el Comandante Walter Marty Schirra Jr., el piloto del módulo de mando Donn Fulton Eisele, y el piloto del módulo lunar Ronnie Walter Cunningham (ver Figura 3.18).



Figura 3.18. Tripulación Apolo 7 (Imagen de: www.nasa.gov)

La nave fue puesta en una órbita de aparcamiento (entre 230 y 285 km de altura) y durante las 163 orbitas a la Tierra que completó, se comprobaron el funcionamiento de la capsula espacial del módulo de mando y del módulo de servicio, así como los sistemas de comunicación. También se probó un acoplamiento con la tercera fase del Saturno, simulando así la unión con el módulo lunar.

Tras 10 días de misión, el amerizaje se produjo el 22 de octubre de 1968 a menos de 15 km del lugar previsto para ello.



Figura 3.17.
Emblema Apolo 7
(Imagen de:
www.nasa.gov)

Apolo 8

El Apolo 8 fue la segunda misión tripulada del Programa Apolo. Fue lanzada el 21 de diciembre de 1968 y fue la primera misión tripulada en salir de la órbita terrestre, llegar a la Luna, orbitarla y finalmente volver a la Tierra.

Los miembros de la tripulación fueron el Comandante Frank Frederick Borman II, el piloto del módulo de mando James Arthur Lovell, y el piloto del módulo lunar William Alison Anders (ver Figura 3.20).



Figura 3.19.
Emblema Apolo 8
(Imagen de:
www.nasa.gov)



Figura 3.20. Tripulación Apolo 8 (Imagen de: www.nasa.gov)

El objetivo general de la misión fue demostrar el rendimiento del módulo de mando y servicio en un entorno cislunar (entre la Tierra y la Luna) y la órbita lunar, evaluar el desempeño de la tripulación en una misión de órbita lunar, demostrar el funcionamiento de las comunicaciones y obtener fotografías de alta resolución de las zonas de alunizaje propuestas. Todos los objetivos se cumplieron con éxito.



Figura 3.21. Imagen de la Tierra desde la órbita lunar de Apolo 8 (Imagen de: www.nasa.gov)

A las 68 horas de misión se produjo una pérdida de señal debida a que el Apolo 8 pasó por detrás de la Luna. En ese momento, los tres astronautas se convirtieron en los primeros humanos en ver el lado oculto de la Luna.

El hecho de que la misión tuviera éxito abrió paso para que el Apolo 11 cumpliera el deseo de presidente John F. Kennedy, asesinado en 1963, de llevar al ser humano a la Luna antes de que terminara la década de 1960.

El Apolo 8 amerizó en el Océano Pacífico el 27 de diciembre.

Apolo 9

El Apolo 9 fue lanzado el 3 de marzo de 1969 con una tripulación formada por el Comandante James McDivitt, el piloto del módulo de mando David Scott y el piloto del módulo lunar Russell Schweickart (ver Figura 3.23).

Los objetivos primarios de esta misión fueron probar el módulo lunar y el adaptador del vehículo espacial, completar las maniobras de acoplamiento y desacoplamiento, realizar un encuentro módulo lunar-módulo de mando, demostrar la capacidad extravehicular y realizar funciones del sistema por periodos comparables a los de las misiones lunares. Todos los objetivos principales de esta misión se cumplieron.



Figura 3.22.
Emblema Apolo 9
(Imagen de:
www.nasa.gov)



Figura 3.23. Tripulación Apolo 9 (Imagen de: www.nasa.gov)

Russell Schweickart efectuó una salida al espacio de 37 minutos de duración, con el objetivo de probar el traje espacial de los astronautas, valorado en 100.000 dólares cada uno. Estos trajes, eran capaces de resistir temperaturas de -150 a 130 grados centígrados, debían proteger a los astronautas del impacto de micrometeoritos, garantizar las comunicaciones y suministrar soporte vital durante tres horas.

Para finalizar esta exitosa misión de diez días en órbita terrestre, el modulo de mando del Apolo 9 amerizó en el Océano Atlántico el 13 de marzo de 1969.

Apolo 10

El Apolo 10 fue el cuarto vuelo tripulado del Programa Apolo, fue lanzado el 18 de mayo de 1969 con una tripulación constituida por el Comandante Thomas Patten Stafford, el piloto del módulo de mando John Watts Young y el piloto del módulo lunar Eugene Andrew Cernan (ver Figura 3.25).



Figura 3.24.
Emblema Apolo
10 (Imagen de:
www.nasa.gov)

Esta misión abarcó todos los aspectos de un alunizaje real con tripulación, excepto que no alunizó. Fue el primer vuelo de una nave espacial Apolo completa y tripulada para operar alrededor de la Luna. Los objetivos incluyeron una órbita lunar programada de 8 horas del módulo lunar, y descenso a cerca de 15 km de la superficie lunar antes de ascender para acoplarse al módulo de comando. Todos los objetivos de la misión fueron alcanzados satisfactoriamente.



Figura 3.25. Tripulación Apolo 10 (Imagen de: www.nasa.gov)

Tras 8 días de misión, el Apolo 10 amerizó en el Océano Pacífico el 26 de mayo.

Apolo 11

El Apolo 11 fue una misión que cumplió el objetivo principal del Programa Apolo, realizar un alunizaje, que un ser humano caminara sobre la superficie lunar y regresar a la Tierra, cumpliendo así el deseo que el presidente John Kennedy expresó en su discurso ante el congreso el 25 de mayo de 1961.



Figura 3.26.
Emblema Apolo
11 (Imagen de:
www.nasa.gov)

La tripulación estaba formada por el Comandante Neil Armstrong, el piloto del módulo lunar Michael Collins y el piloto del módulo lunar Edwin Eugene Buzz Aldrin (ver Figura 3.27). El Comandante Neil Armstrong fue el primer ser humano que pisó la superficie de la Luna, el 21 de julio de 1969, seis horas y media después de haber alunizado, pronunció las célebres palabras “un pequeño paso para el hombre, un gran paso para la humanidad”.



Figura 3.27. Tripulación Apolo 11 (Imagen de: www.nasa.gov)

Fue lanzado desde el Complejo de Lanzamiento 39, del Centro Espacial Kennedy (Florida), el 16 de julio de 1969. El módulo lunar llegó a la superficie del satélite el 20 de julio y al día siguiente dos astronautas (Armstrong y Aldrin) caminaron sobre la superficie lunar.

La denominación de las naves, privilegio del Comandante, fue “Eagle” para el módulo lunar y “Columbia” para el modulo de mando.

Los objetivos adicionales de la misión incluyeron: exploración científica por parte del módulo lunar, despliegue de una cámara de televisión para transmitir señales a

la Tierra, despliegue de un experimento de composición del viento solar, despliegue de un paquete de experimentos sísmicos y despliegue de un reflector de rayos láser.

Previo al desarrollo de la misión, se estudiaron lugares de alunizaje durante más de dos años. El objetivo de la serie de misiones Lunar Orbiter era reconocer posibles lugares de alunizaje para las misiones Apolo. Se concentraron en aquellos que parecían adecuados sobre la base de estudios telescópicos. De los 30 lugares candidatos originales, sólo se seleccionaron tres siguiendo los siguientes factores:

- Suavidad del terreno: relativamente pocos cráteres y rocas.
- Condiciones de alunizaje: que no hubiera grandes colinas, acantilados o cráteres profundos en el lugar de alunizaje, que pudieran dar señales de altitud erróneas al módulo lunar a la hora de realizar el alunizaje.
- Requisitos de combustible: que la zona implicara el menor gasto de combustible posible.
- Retorno libre: una zona en la que a la hora de iniciar el retorno la gravedad terrestre hiciera que el vehículo espacial retornara a la Tierra sin propulsión.
- Pendiente: que tuviera menos de 2 grados de pendiente.

De entre estos tres candidatos, el equipo de la dinámica de vuelo, insistió en que el lugar fuera al este del meridiano lunar, para dejar al oeste uno o dos sitios de reserva. También que la zona debía estar en una franja dentro de los 5 grados de latitud, ya que una mayor latitud implicaría una trayectoria menos eficiente y la economía del propulsor era una prioridad para el primer alunizaje. Además, el lugar debía ser plano para evitar la necesidad de maniobrar en la fase final de descenso del módulo lunar. Todas estas restricciones hicieron que la zona elegida para el primer alunizaje fuese el Mar de la Tranquilidad.

Sin embargo, un problema en la maniobra de descenso provocó un desplazamiento de la zona prevista para alunizar. Cuando el módulo lunar se desconectó del Columbia comenzó una complicada maniobra de descenso a la superficie lunar. Cuando el módulo lunar se encontraba a menos de 20 km del lugar exacto, el oficial de guiado comunicó al director de vuelo que el módulo lunar viajaba a más velocidad de la programada. Debido a esto, el módulo sobrepasó el lugar

donde debía haber alunizado. Al parecer el ordenador les estaba conduciendo hacia un gran cráter con rocas esparcidas a su alrededor que causarían serios daños al módulo si se produjese el alunizaje. Ante esta situación, Armstrong introdujo un programa de control semiautomático en el ordenador que dejó en manos de la tripulación el movimiento de traslación lateral del módulo lunar. De esta manera el Comandante deslizó el módulo lunar sobre la superficie, mientras Aldrin le iba leyendo los datos del radar, en busca de un lugar adecuado para el alunizaje, hasta que a menos de dos metros de la superficie una de las varillas que cuelgan de las patas del módulo, tocó el suelo y el Eagle recorrió el último metro en una suave caída gracias a la débil gravedad lunar.

Una vez en la superficie, los astronautas tuvieron que realizar varias tareas durante las actividades extravehiculares (EVA). Los astronautas debían recolectar muestras lunares, desplegar varios experimentos y examinar y fotografiar la superficie (ver Figura 3.28).

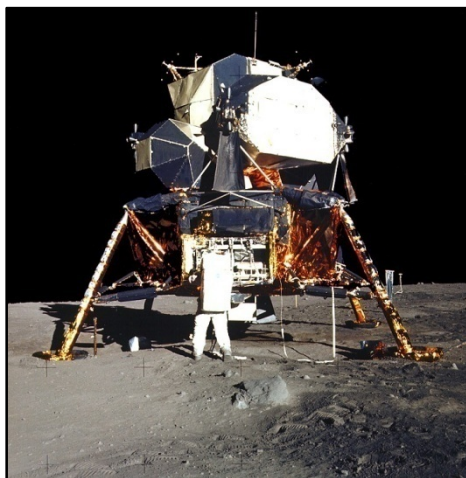


Figura 3.28. Buzz Aldrin junto al módulo lunar en la superficie lunar (Imagen de: www.nasa.gov)

Armstrong y Aldrin pasaron 21 horas y 36 minutos en la superficie de la Luna. Después de un periodo de descanso, el motor de la etapa de ascenso se inició y posteriormente se produjo el acoplamiento con el Columbia. Los procedimientos para el reingreso en la Tierra se iniciaron el 24 de julio. El Apolo 11 amerizó en el Océano Pacífico.

La misión, incluyendo el alunizaje y la exploración superficial, se llevó a cabo con habilidad, precisión y relativa facilidad. El excelente desempeño de la nave en todos

los aspectos del programa permitió la ejecución segura y eficiente de esta misión, considerada como uno de los momentos más significativos de la historia de la humanidad.

Apolo 12

El Apolo 12, segunda misión de alunizaje, tenía varios objetivos para la tripulación: realizar una inspección de la zona y recoger muestras, desplegar una serie de experimentos (Apollo Lunar Surface Experiments Package, ALSEP), desarrollar técnicas para un alunizaje de precisión, desarrollar aun más la capacidad de trabajar en ambiente lunar, y obtener fotografías de los próximos lugares de alunizaje cercanos.

Fue lanzado desde el Complejo de lanzamiento 39, del Centro Espacial Kennedy (Florida), el 14 de noviembre de 1969. La tripulación estaba compuesta por el Comandante Charles Conrad, el piloto del módulo de mando Richard Francis Gordon y el piloto del módulo lunar Alan LaVerb Bean (ver Figura 3.30).



Figura 3.29.
Emblema Apolo
12 (Imagen de:
www.nasa.gov)



Figura 3.30. Tripulación Apolo 12 (Imagen de: www.nasa.gov)

El enfoque conservador de la NASA para la selección del lugar de alunizaje dio lugar a otra zona poco característica, el Océano de las Tormentas. Fue elegido porque tenía pocos cráteres y rocas, tenía menos de 2 grados de pendiente, no tenía grandes colinas, ni acantilados, ni cráteres profundos que pudieran reflejar datos erróneos en el radar de altitud del módulo lunar a la hora de alunizar. También, en la lección del lugar se tuvo en cuenta tener el menor gasto posible de combustible, así como la seguridad de la tripulación y de la misión.

Estos criterios dictaban el alunizaje en una región de mar cerca del ecuador. El mar regional del Océano de las Tormentas tuvo una alta prioridad debido a que el estudio telescópico sugirió que esta área era más joven y de una composición ligeramente diferente del lugar de alunizaje del Apolo 11.

Además, este lugar ofrecía la posibilidad de muestrear eyecciones del gran cráter Copérnico, conociendo así la edad de dicho cráter. También permitió una buena imagen orbital de Fra Mauro, que fue explorado posteriormente por el Apolo 14.

Dado que el Apolo 11 se alejó cerca de 18 km del objetivo previsto, el objetivo del Apolo 12 era realizar un alunizaje de precisión, para poder realizar misiones más complejas en el futuro.

Esta misión proporcionó la primera oportunidad de estudiar la Luna extensamente en un radio de 500 metros del lugar de alunizaje. Durante los dos EVAs los astronautas, Conrad y Bean, recogieron muestras lunares, desplegaron varios experimentos, y examinaron y fotografiaron la superficie lunar.

Una vez finalizadas las actividades en la superficie lunar, el motor de la etapa de ascenso del módulo lunar arrancó y posteriormente el módulo lunar se acopló al módulo de mando. La etapa de ascenso fue desechada y estrellada contra la Luna intencionadamente para proporcionar datos de impacto al ALSEP.

La misión Apolo 12 concluyó 10 días después de su lanzamiento, el 24 de noviembre, cuando amerizó en el Océano Pacífico.

Apolo 13

Apolo 13 fue la séptima misión tripulada del Programa Apolo y la tercera con el objetivo de alunizar. Su lanzamiento se produjo el 11 de abril de 1970. El alunizaje fue abortado debido a la explosión de un tanque de oxígeno dos días después del despegue, inhabilitando el módulo de servicio, del cual dependía el módulo de mando y teniendo que usar el módulo lunar como bote salvavidas para regresar a la Tierra.

Los miembros de la tripulación fueron el Comandante James Arthur Lovell, el piloto del módulo de mando John Leonard Swigert y el piloto del módulo lunar Fred Wallace Haise (ver Figura 3.31).



Figura 3.31.
Emblema Apolo
13 (Imagen de:
www.nasa.gov)



Figura 3.32. Tripulación Apolo 13 (Imagen de: www.nasa.gov)

Los objetivos de la misión eran realizar un alunizaje de precisión, recoger muestras de materiales de un lugar determinado, desplegar un paquete de experimentos sobre la superficie y desarrollar la capacidad humana para trabajar en un entorno lunar.

Las fases tierra-orbitales y translunar se llevaron a cabo sin ningún problema. Sin embargo, a las 55 horas del lanzamiento, el tanque de oxígeno número 2 explotó, dejando así sin suministro eléctrico y sin agua al módulo de mando, y a una distancia de 322.000 km de la Tierra. En ese momento el Comandante pronunció aquellas palabras mientras hablaba con control de misión “Houston, tenemos un problema”.

Este hecho hizo que el módulo lunar se convirtiese en la única fuente de energía y oxígeno para regresar a la Tierra y se tomó la decisión de abortar la misión. A partir de entonces las principales tareas fueron planificar y conducir las maniobras de propulsión necesarias para devolver el módulo lunar a la Tierra, y gestionar el uso del combustible, habiendo sido diseñado para utilizarse únicamente con dos tripulantes y no con tres. Los consumibles más críticos fueron el agua, utilizada para enfriar los sistemas del LM, el oxígeno para respirar, y los bidones de filtro de hidróxido de litio utilizados para eliminar el dióxido de carbono de la atmósfera de la cabina, pues los bidones del módulo de mando no eran compatibles con las aperturas del módulo lunar. Los ingenieros en Houston desarrollaron un método que permitió a la tripulación utilizar materiales a bordo para construir un dispositivo que permitiera el uso de los bidones. La investigación posterior evidenció que el accidente se produjo debido a un cortocircuito.

El viaje de vuelta estuvo marcado por la falta de alimentos y agua potable, y por la falta de sueño debido al frío, pues cuando los sistemas eléctricos fueron apagados, la nave perdió una importante fuente de calor. A pesar de los apuros, la tripulación pudo regresar a salvo a la Tierra el 17 de abril.

El objetivo del Apolo 13 era alunizar en la zona volcánica Fra Mauro, llamado así por el cráter Fra Mauro, de 80 km de diámetro. La siguiente misión, Apolo 14, que estaba planeado que alunizara en el cráter Littrow, finalmente alunizó en Fra Mauro debido al fracaso de Apolo 13.

Apolo 14

Esta misión fue lanzada el 31 de enero de 1971 desde el Complejo de Lanzamiento 39 del Centro Espacial Kennedy (Florida). Los miembros de la tripulación fueron el Comandante Alan Barlett Shepard, el piloto del módulo de mando Stuart Allen Roosa y el piloto del módulo lunar Edgar Dean Mitchell (ver Figura 3.34).



Figura 3.33.
Emblema Apolo 14
(Imagen de:
www.nasa.gov)



Figura 3.34. Tripulación Apolo 14 (Imagen de: www.nasa.gov)

Esta misión logró el tercer alunizaje del Programa Apolo y sus objetivos fueron investigar la superficie lunar en un punto preseleccionado, desplegar y activar un paquete de experimentos, desarrollar la capacidad de trabajar en ambiente lunar y obtener fotografías de los lugares de exploración candidatos. Los objetivos fueron los mismos prácticamente que para Apolo 13, con la diferencia de que se tomó una mayor cantidad de muestras lunares de las planeadas para la misión fallida. Esto fue posible gracias a la provisión de un carro plegable de dos ruedas, el Modular Equipment Transporter (MET), para transportar herramientas, cámaras, un magnetómetro portátil y muestras lunares (ver Figura 3.35).

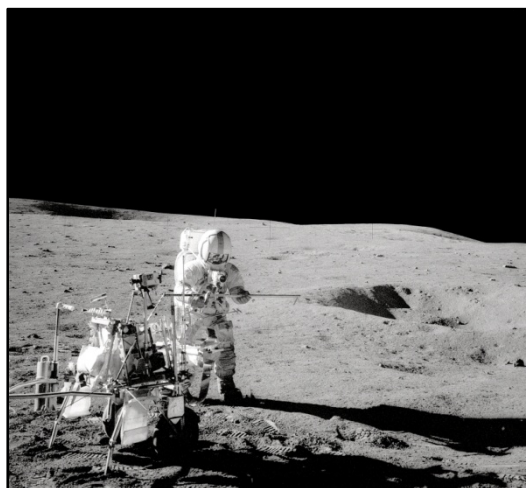


Figura 3.35. MET sobre la superficie lunar (Imagen de: www.nasa.gov)

En cuanto a la zona de alunizaje, la formación Fra Mauro, heredada de la abortada misión Apolo 13, está situada en un valle ancho y poco profundo y aproximadamente a 500 km del borde de la cuenca Imbrium. El cráter principal Copérnico se encuentra a 360 km al norte. El objetivo principal por el cual se escogió

este lugar fue el de muestrear material excavado por el impacto Imbrium, formado por el impacto de un gran objeto.

Después del éxito del alunizaje en Apolo 12, los planificadores de las misiones estaban dispuestos a considerar alunizajes en regiones más difíciles pero geológicamente más interesantes. Sin embargo, las zonas estaban aun restringidas a zonas cercanas al ecuador. Además, las zonas de alunizaje seleccionadas debían lograr los objetivos científicos de alta prioridad dentro de los límites de dos EVAs de 4 horas de duración.

Este lugar también fue elegido por estar cerca del cráter Cone, una estructura de impacto joven de 370 metros de diámetro, y se eligió este cráter por ser lo suficientemente grande para penetrar a través del regolito lunar que se ha ido depositando desde que se formó Fra Mauro por el material eyectado del impacto Imbrium.

La misión finalizó el 9 de febrero con el tercer alunizaje exitoso y demostró un excelente desempeño de todos los elementos contribuyentes, que dio como resultado una gran cantidad de información científica.

Apolo 15

Apolo 15 fue la novena misión tripulada del Programa Apolo y la cuarta en alunizar. Fue lanzada el 26 de julio de 1971 con una tripulación formada por el Comandante Davis Randolph Scott, el piloto del módulo de mando Alfred Merrill Worden y el piloto del módulo lunar James Benson Irwin (ver Figura 3.37).



Figura 3.36.
Emblema Apolo
15 (Imagen de:
www.nasa.gov)

Esta misión fue diseñada para llevar a cabo la exploración lunar durante periodos de tiempo más largos y con más instrumentos para la adquisición de datos científicos. Los objetivos principales de la misión fueron realizar inspecciones selenológicas en la zona, desplegar y activar experimentos superficiales, evaluar la capacidad del equipo Apolo durante un tiempo prolongado en la superficie lunar, y realizar experimentos en vuelo y tareas fotográficas desde la órbita lunar.



Figura 3.37. Tripulación Apolo 15 (Imagen de: www.nasa.gov)

Una vez en la superficie lunar, los astronautas Scott e Irwin utilizaron por primera vez un vehículo explorador lunar, el rover lunar (LRV) con el que recorrieron una distancia total de 27,9 km (ver Figura 3.38).

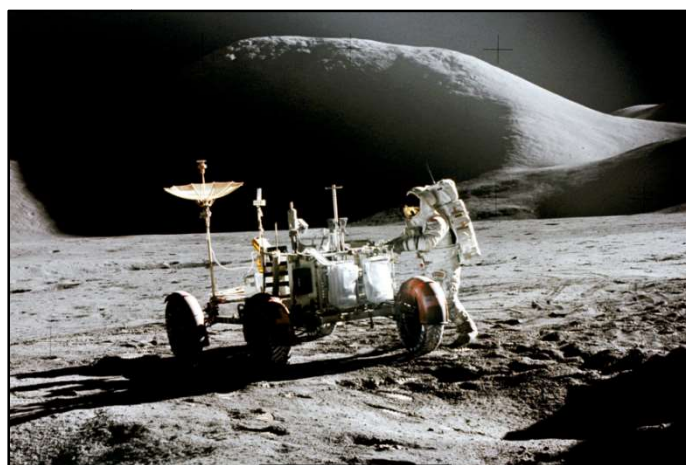


Figura 3.38. Rover lunar utilizado en la misión Apolo 15 (Imagen de: www.nasa.gov)

La zona de alunizaje se encuentra en el borde oriental del Mare Imbrium, justo al sur del canal de apertura del Mare Serenatis, una región conocida como Palus Putredinis. El lugar de alunizaje está justo al este del cráter Julienne y al norte del Mons Hadley en la región conocida como el Delta Mons Hadley.

Con los mares orientales y occidentales, y la formación Fra Mauro ya exploradas por anteriores misiones, se necesitaba un lugar con características múltiples para sacar partido de la capacidad exploradora que daba el vehículo lunar. La zona finalmente elegida tenía dos objetivos principales: el borde de la cuenca Imbrium podía ser muestreado y proporcionaba una oportunidad para explorar Hadley Rille,

que los científicos creían formados por procesos volcánicos. Los investigadores esperaban que el material recogido proporcionara muestras más profundas de la corteza lunar de las que fueron tomadas en Fra Mauro en Apolo 14.

La misión finalizó con éxito el 7 de agosto cuando la nave amerizó en el Océano Pacífico, logrando todos sus objetivos primarios y proporcionando a los científicos gran cantidad de nueva información.

Apolo 16

Apolo 16 fue la décima misión tripulada y el quinto alunizaje del Programa Apolo. Fue lanzada desde el Centro Espacial Kennedy el 16 de abril de 1972 con una tripulación formada por el Comandante John Watts Young, el piloto del módulo de mando Thomas Kenneth Mattingly y el piloto del módulo lunar Charles Moss Duke (ver Figura 3.40).



Figura 3.39.
Emblema Apolo 16 (Imagen de:
www.nasa.gov)



Figura 3.40. Tripulación Apolo 16

Los objetivos primarios de la misión fueron: realizar inspecciones selenológicas, muestreo de materiales y características superficiales en un área preseleccionada, emplazar y activar experimentos en la superficie, y realizar experimentos en vuelo y obtener fotografías desde la órbita lunar. En esta misión también se utilizó el rover lunar.

En cuanto a la zona de alunizaje, hasta este punto del Programa Apolo, tres alunizajes fueron en regiones de mares y la cuarta sobre el material eyectado del

impacto Imbrium, por lo que el objetivo del alunizaje en Apolo 16 fueron las regiones montañosas.

La región Descartes, al oeste del Mare Nectaris, y el cráter Alphonsus fueron las principales alternativas consideradas para la misión. Los científicos creían antes de Apolo 16, que las formaciones Descartes y Cayley eran de origen volcánico, pero a partir de las muestras analizadas de esta misión se vio que en realidad eran brechas producidas por impactos más que por actividad volcánica. De la densidad de cráteres de impacto, la formación Cayley se pensó que era comparable en edad al impacto Imbrium. Estos estudios geológicos previos sugirieron que estas dos formaciones cubrían alrededor del 11% del lado visible de la Luna, haciéndolas importantes para la comprensión general de la historia de la Luna. Además, la gran distancia entre las zonas de alunizaje de misiones anteriores y de Descartes, fue útil para la red de instrumentos creados para las misiones Apolo 12-16. El cráter Alphonsus fue considerado como posible lugar de alunizaje debido a la posibilidad de recolección de muestras del relleno del cráter, como posible material pre-Imbrium. Sin embargo, algunos geólogos consideraban que la zona podía haber sido contaminada por las eyecciones del impacto Imbrium. De manera que, la zona elegida finamente para alunizar fue Descartes.

El desarrollo general de la misión fue excelente, con todos los objetivos principales y la mayoría de los secundarios logrados. La misión terminó el 27 de abril cuando el Apolo 16 amerizó en el Océano Pacífico.

Apolo 17

Apolo 17 fue lanzado el 7 de diciembre de 1972 y fue la séptima y última misión de alunizaje, la encargada de llevar a los últimos astronautas a la Luna. La tripulación estaba compuesta por el Comandante Eugene Andrew Cernan, el piloto del módulo de mando Ronald Ellwin Evans y el piloto del módulo lunar Harrison Hagan Schmitt (primer científico-astronauta en llegar a la Luna) (ver Figura 3.42).



Figura 3.41.
Emblema Apolo
17 (Imagen de:
www.nasa.gov)



Figura 3.42. Tripulación Apolo 17 (Imagen de: www.nasa.gov)

Los objetivos primarios de la misión fueron: realizar inspecciones selenológicas, muestreo de materiales y características superficiales en un área preseleccionada, emplazar y activar experimentos en la superficie, y realizar experimentos en vuelo y obtener fotografías desde la órbita lunar. Todo ello con ayuda del rover lunar.

La zona de alunizaje seleccionada para Apolo 17 estaba en el valle de Taurus-Littrow, en el borde suroriental del Mare Serenatis. A medida que se comprendía la formación de la cuenca Imbrium, el objetivo era el vulcanismo como prueba inequívoca de que la Luna había sido volcánicamente activa en los últimos 100 millones de años. Por lo tanto, los dos objetivos principales fueron la obtención de muestras de material de las tierras altas que eran más antiguas que el impacto Imbrium y la investigación del posible vulcanismo joven en esa región.

Taurus-Littrow fue uno de varios lugares considerados, junto con el cráter Tycho, el cráter Copérnico y el cráter Tsiolkovsky en la cara oculta de la Luna. El cráter Tycho fue considerado demasiado peligroso debido a la aspereza del terreno. El cráter Copérnico era una zona de baja prioridad. Y una misión lejana al cráter Tsiolkovsky crearía importantes problemas de comunicación, con la necesidad de colocar costosos satélites de comunicación en órbita alrededor de la Luna para proporcionar comunicaciones continuas con el control de misión y el módulo de mando. Por lo tanto, la zona elegida fue Taurus-Littrow.

Esta zona se encuentra entre dos macizos geológicos, donde la evidencia observacional muestra material oscuro de deslizamientos de tierra o depósitos piroclásticos. Los estudios posteriores a Apolo 17 sugirieron que hace aproximadamente

100 millones de años, la lava se filtró a la superficie lunar y se inundó y se agruparon para formar el área Tauros-Littrow y el Mar de la Serenidad.

La misión finalizó con el amerizaje del Apolo 17 el 19 de diciembre de 1972.

Finalización del Programa Apolo

Con esta misión se finalizó el Programa Apolo. Se consiguió el objetivo de trasladar al ser humano a nuestro satélite antes que la Unión Soviética y se demostró la posibilidad no demasiado lejana de establecer bases lunares permanentes. Durante la duración del programa se lograron importantes avances en la astronáutica y en los conocimientos de la geología lunar. Las tres últimas misiones fueron mucho más sofisticadas, en gran parte porque los astronautas llevaron el rover lunar. En la misión Apolo 11, Armstrong y Aldrin estuvieron sólo 2 horas y media sobre la superficie, mientras que en Apolo 17 llegaron a un total de 22 horas repartidas en tres días de estancia en la superficie lunar.

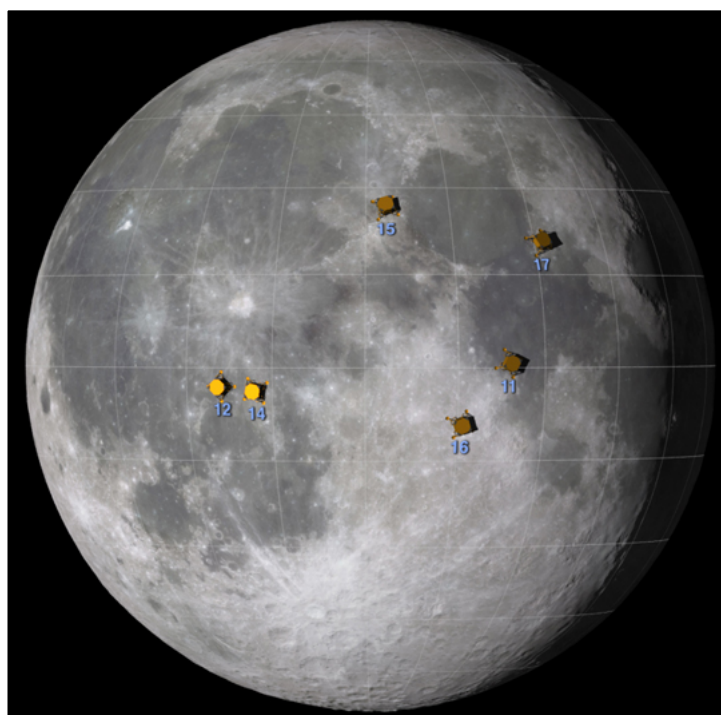


Figura 3.43. Localización de los alunizajes del Programa Apolo (Imagen de: www.nasa.gov)

4. MATERIAL Y METODOLOGÍA

4.1. Material

4.1.1. Datos

Los conjuntos de datos usados para la realización de este trabajo han sido los siguientes:

- **LRO LOLA and Kaguya Terrain Camera DEM Merge 60N60S 512ppd (59m).**

Modelo Digital de Elevaciones lunar que cubre las latitudes dentro de $\pm 60^\circ$ con una resolución de 512 píxeles por grado (59 metros/píxel) y una precisión vertical típica de 3 a 4 metros. Este MDE está construido a partir de alturas precisas registradas por el altímetro laser (LOLA) a bordo del LRO, al cual se han corregido observaciones de la Terrain Camera (TC) a bordo de SELENE (misión japonesa desarrollada y operada por JAXA).

Este producto fue producido para generar un modelo topográfico global de alta resolución y un marco geodésico que permita una orientación precisa para llevar a cabo actividades exploratorias.

Este producto ha sido descargado de la plataforma MAP2 (https://astrogeology.usgs.gov/search/map/Moon/LRO/LOLA/Lunar_LRO_LroKaguya_DEMmerge_60N60S_512ppd).

- **Apollo Landing Site DTM**

Modelo Digital del Terreno de cada uno de los alunizajes de las misiones Apolo con una resolución de 2 metros/píxel y un RMS vertical de 1,81 metros. Este modelo ha sido construido a partir de las imágenes estereoscópicas de las dos cámaras NAC (NACL y NACR) y observaciones de altura del altímetro láser LOLA a bordo del LRO. Las imágenes se adquieren en dos orbitas diferentes por lo que hay cuatro imágenes (dos pares NACL y NACR), cuya superposición proporciona tres o

cuatro modelos estereoscópicos de los cuales se pueden construir modelos digitales del terreno.

Este producto se ha descargado de la página del instrumento LROC a bordo del LRO (ejemplo de la zona de la misión Apolo 11: http://wms.lroc.asu.edu/lroc/view_rdr/NAC_DTM_APOLLO11).

- **Mosaico de imágenes de alta resolución de las zonas de alunizaje**

Mosaico formado por las cuatro imágenes (dos pares NACL y NACR) utilizadas para la formación del Modelo Digital del Terreno anteriormente explicado, con una resolución de 1,4 metros/pixel.

Este producto ha sido descargado de la página del instrumento LROC a bordo del LRO (ejemplo de la zona de la misión Apolo 11: http://wms.lroc.asu.edu/lroc/view_rdr/NAC_ROI_APOLLO11HIA).

- **Ortofotografía de alta resolución de las zonas de alunizaje.**

Imagen orto-rectificada procedente de las cámaras NAC con una resolución de 0,5 metros/pixel.

Este producto ha sido descargado de la página del instrumento LROC a bordo del LRO (ejemplo de la zona de la misión Apolo 11: http://wms.lroc.asu.edu/lroc/view_rdr_product/NAC_DTM_APOLLO11_M150361817_50CM).

4.1.2. Software

El software utilizado para la realización de este trabajo ha sido el siguiente:

- **QGIS**

QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre. Permite manejar formatos raster y vectoriales a través de las bibliotecas GDAL y OGR, así

como bases de datos. Sus principales características son: manejo de archivos vectoriales (Shapefile, ArcInfo coverages, Mapinfo, GRASS GIS, etc.), soporte para un número importante de tipos de archivos raster (GeoTIFF, JPG, TIFF, etc.) y la posibilidad de integrar plugins desarrollados tanto en C++ como en Python.

Este software ha sido utilizado para la realización de la mayor parte del trabajo, desde el análisis de las zonas de alunizaje hasta la elaboración de la cartografía de cada una de ellas.

- **GvSIG Desktop**

GvSIG es un proyecto de desarrollo de software para Sistemas de Información Geográfica basado en software libre. Este proyecto fue impulsado por el gobierno de la Comunidad Valenciana, dentro de un proceso de migración a software libre de todos los sistemas de información de la organización.

GvSIG Desktop es un programa informático para el manejo de información geográfica con precisión cartográfica que se distribuye bajo licencia GNU GPL v3. Permite acceder a información vectorial y rasterizada, así como ha servidores de mapas que cumplan las especificaciones OGC.

Este software ha sido utilizado para la realización de los perfiles topográficos de cada una de las zonas de alunizaje.

- **ENVI**

El software ENVI se utiliza para procesar y analizar imágenes geoespaciales. Es de uso común por los profesionales de teledetección y analistas de imágenes. Agrupa una serie de algoritmos científicos para el procesamiento de imágenes, muchos de los cuales están contenidos en un enfoque automatizado basado en asistentes que guía a los usuarios a través de tareas complejas.

Este software ha sido utilizado en este trabajo para realizar un filtrado de paso bajo a los modelos digitales de elevaciones.

4.2. Metodología

4.2.1. Definición del sistema de coordenadas de referencia

Lo primero que se ha hecho antes de realizar ningún proceso de análisis de la topografía es definir el sistema de referencia en el que se han descargado los datos geográficos lunares de la plataforma MAP2 y de la página web del instrumento LROC a bordo del Lunar Reconnaissance Orbiter.

Los datos con los que vamos a trabajar para analizar las distintas zonas de alunizaje de las misiones Apolo se han descargado en la proyección Moon Transverse Mercator y Equirectangular.

QGIS tiene muchas opciones de proyección de mapas. Sin embargo, prácticamente todas son terrestres, por lo que se ha definido un sistema de coordenadas personalizado que nos permita trabajar con los datos lunares.

Para ello, en Configuración → SRC personalizado, y añadir un nuevo SRC asignándole un nombre y los parámetros correspondientes (ver Figura 4.1). En este se añade la proyección Moon Transverse Mercator, definida por la Union Astronomica Internacional (IAU). Para el caso de la proyección Equirectangular se procedería de la misma manera.

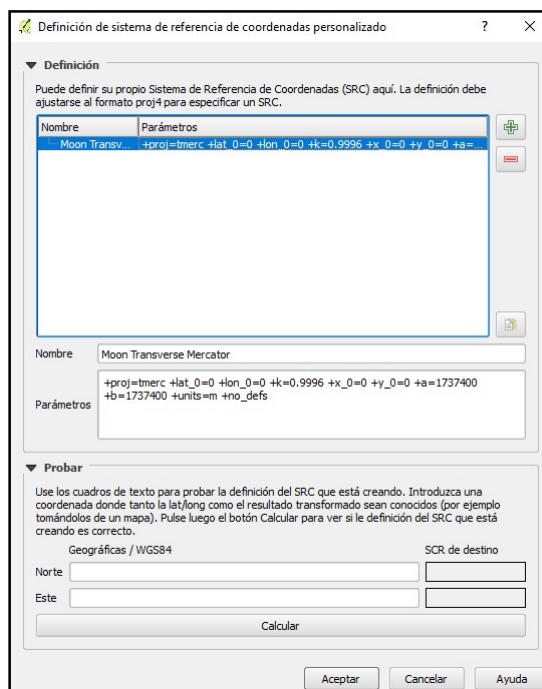


Figura 4.1. Definición de sistema de referencia

QGIS se construye utilizando bibliotecas GDAL/OGR, que maneja la traducción y la proyección de datos geográficos, incluyendo imágenes georreferenciadas. Estas, a su vez, se basan en la biblioteca PROJ.4, que maneja la reproyección real de coordenadas. Esto significa que podemos usar las cadenas “+proj...” internas para forzar a QGIS a utilizar proyecciones que no están incorporadas, como acabamos de hacer.

Los parámetros de la cadena “proj” se han obtenido de la página spatialreference.org (ver Figura 4.2) donde están registrados prácticamente todos los sistemas de coordenadas. Su objetivo es describir los sistemas de referencia espaciales en tantos formatos como sea posible, una especie de GDAL basado en la web.



Figura 4.2. Moon Transverse Mercator en spatialreference.org

Una vez hecho esto, se define este SRC como el SRC del proyecto en el cual se van a tratar los datos geográficos lunares.

4.2.2. Metodología para el análisis de las zonas de alunizaje

El análisis de un Modelo Digital de Elevaciones permite describir una serie de parámetros que caracterizan una superficie en tres dimensiones.

Puede considerarse que el modelo digital de elevaciones contiene información de dos formas diferentes. La primera se da de forma explícita, es decir, mediante los propios datos contenidos en el modelo, y la segunda es una información implícita, en el sentido de que intervienen las relaciones espaciales entre los datos.

Ambos tipos de información permiten obtener información de diferente carácter. Del primer tipo se derivan los descriptores de carácter global como los estadísticos básicos del modelo (media, mediana, varianza, etc.), y del segundo tipo de información se construyen modelos derivados que ponen de manifiesto nuevas variables topográficas (pendiente, orientación, sombreado del relieve, etc.).

Para describir la metodología de los análisis de las zonas de alunizaje, se expone en este apartado los procesos llevados a cabo para analizar la zona de alunizaje de la misión Apolo 11, como ejemplo seguido para el análisis de las demás zonas de alunizaje.

4.2.2.1. Descriptores estadísticos globales

Una vez cargado en QGIS el modelo original directamente descargado de la plataforma MAP2, lo primero que se ha hecho es establecer un nuevo radio lunar para tener valores positivos de altitud que faciliten la comprensión del análisis. Este paso es necesario ya que los datos descargados vienen referidos a un radio lunar de 1.737.400 metros y la zona de alunizaje del Apolo 11 está a un nivel de altitud inferior a este radio medio lunar. Por lo tanto, con la calculadora de campos de QGIS se ha sumado a los valores del modelo + 7.400 metros para establecer un radio de 1.730.000 metros.

Para calcular los estadísticos globales de la zona del Apolo 11 se ha elegido una extensión de terreno de 18 x 18 km centrada en el lugar del alunizaje, de coordenadas selenográficas 0° 40' 27" N 23° 28' 23.3" E. Para ello, se utiliza la herramienta de QGIS "Estadísticas de zona", la cual nos pide como capas de entrada el raster del cual queremos conocer sus estadísticas y una capa vectorial de la zona.

Para calcular esta capa vectorial se han encadenado dos procesos. Primero se ha vectorizado el MDE (ver Figura 4.3) y luego se ha creado un polígono de la extensión de la capa (ver Figura 4.4), obteniendo así la capa vectorial para calcular los estadísticos.

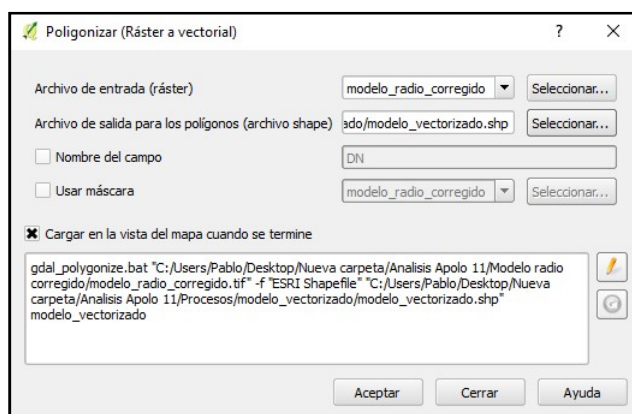


Figura 4.3. Vectorización del MDE

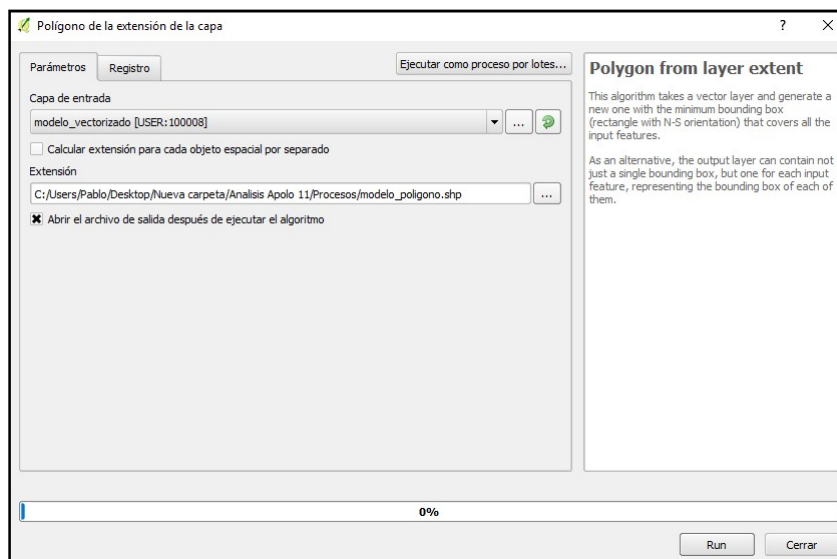


Figura 4.4. Polígono de la extensión de la capa

Una vez hechos estos procesos ya se pueden extraer las estadísticas de la zona usando la herramienta “Estadísticas de zona” (ver Figura 4.5).

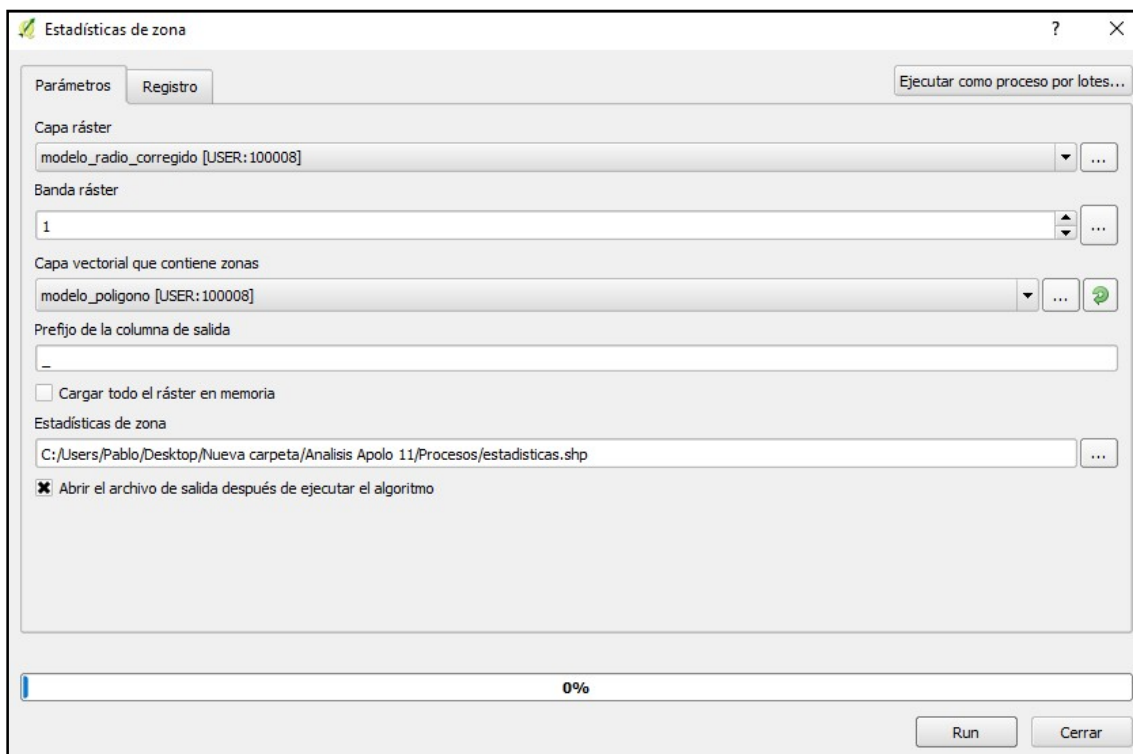


Figura 4.5. Estadísticas de la zona

Esta herramienta devuelve una capa shape en cuya tabla de atributos están las estadísticas de la que zona, que son las siguientes:

Máximo [m]	Mínimo [m]	Media [m]	Mediana [m]
5637,500	5308,000	5483,666	5473,500

Rango [m]	Desviación estándar [m]	Coficiente de variación [%]
329,500	66,433	1,211

Tabla 4.1. Parámetros estadísticos

4.2.2.2. Histograma de elevaciones

Otra medida para llevar a cabo la descripción de la topografía de la zona es el histograma de elevaciones. Se trata de un grafico que muestra la relación entre cada

nivel de altura y la extensión superficial que ocupa la zona estudiada. Esta grafica muestra la existencia de zonas de mayor o menor elevación (ver Figura 4.6).

Para visualizar el histograma de elevación en QGIS en “Propiedades de la capa” y en la pestaña “Histograma” se puede ver.

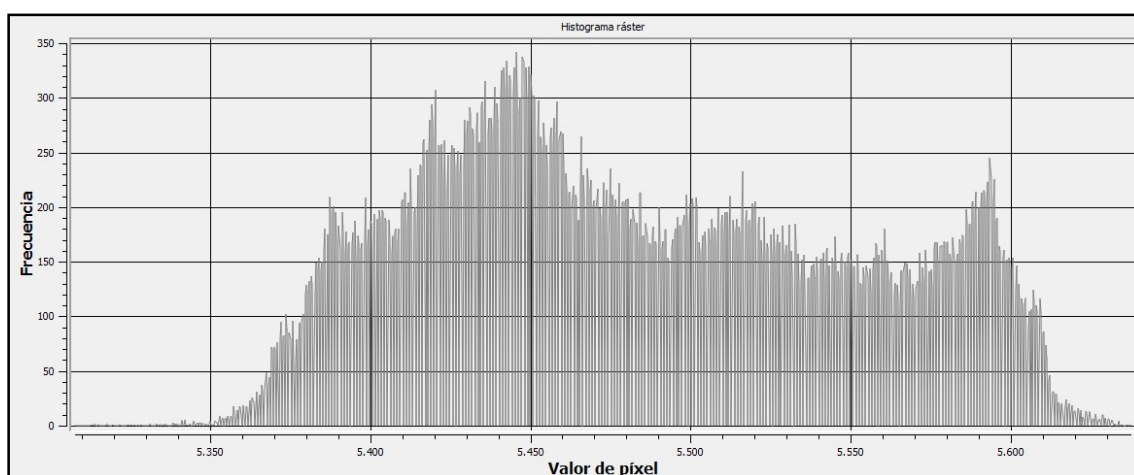


Figura 4.6. Histograma de elevaciones

4.2.2.3. Cómputo de curvas de nivel

Una de las soluciones más empleadas para representar el relieve de una zona determinada es el cómputo de las curvas de nivel. Su cómputo se basa en la suposición de que entre dos curvas de nivel la altura cambia suavemente y es posible calcular su valor preciso mediante un proceso de interpolación.

Para obtener un curvado más suave se ha decidido realizar un filtrado el modelo digital de elevaciones. Se le ha pasado un filtro de paso bajo con una ventana de 7 x 7 píxeles, eliminando así los componentes de alta frecuencia del modelo. Para realizar el filtrado se ha utilizado el software ENVI (ver figura 4.7).

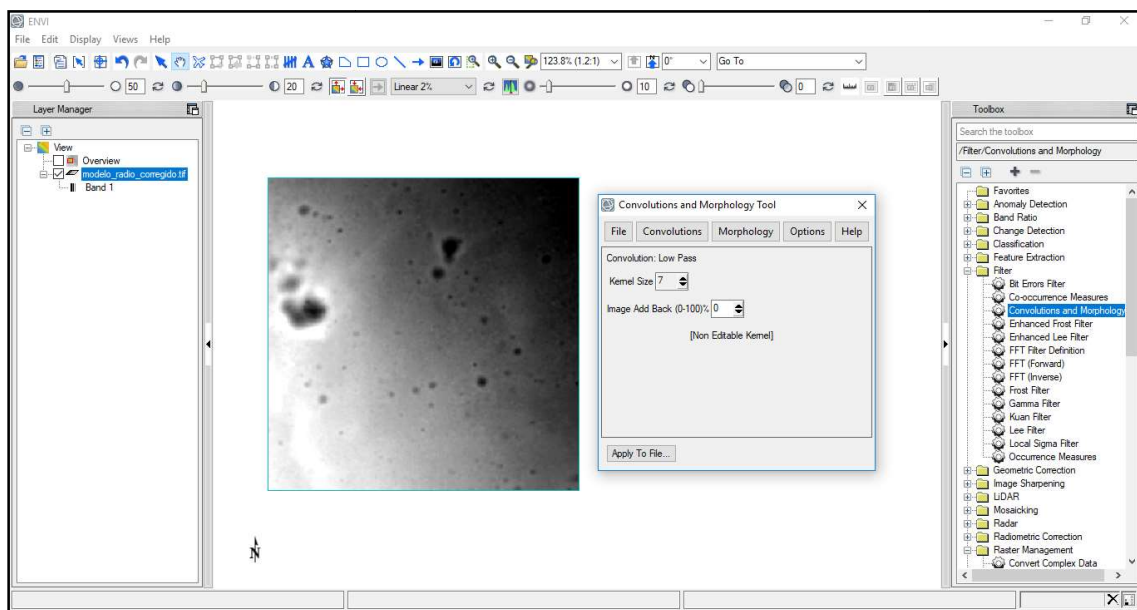


Figura 4.7. Filtro de paso bajo aplicado al modelo

Una vez hecho esto, se ha realizado el curvado en QGIS a partir del modelo digital de elevaciones. Para ello, con la herramienta “Extracción curvas de nivel” se ha elegido el filtrado del modelo como capa de entrada y se ha definido una equidistancia entre curvas de nivel de 20 metros (ver Figura 4.8).

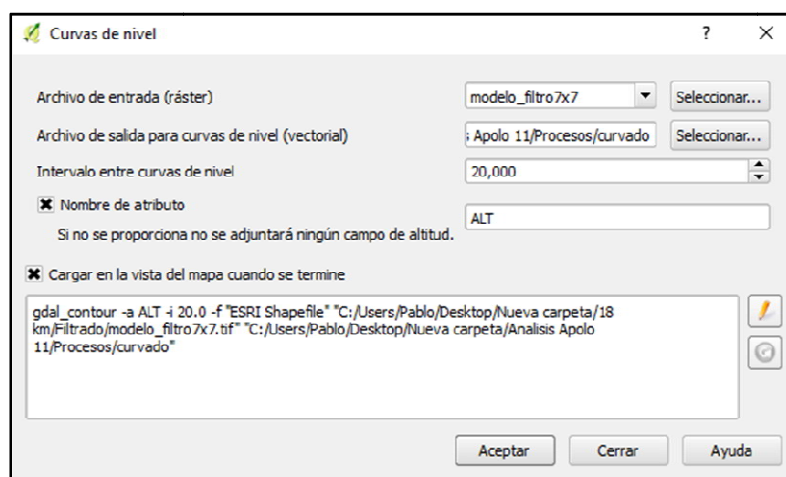


Figura 4.8. Extracción de curvas de nivel

El resultado obtenido es el siguiente:

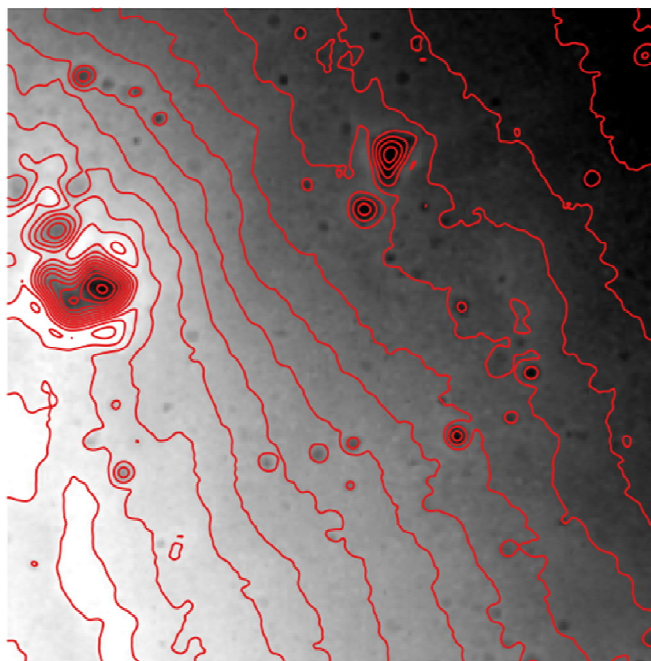


Figura 4.9. Curvado

4.2.2.4. Mapa de pendientes

Una definición inicial del concepto de pendiente es la siguiente: variación de la altura entre dos puntos del terreno en relación a la distancia que los separa.

El procedimiento de cálculo de la pendiente en un punto (pixel) de una superficie es la obtención del plano tangente a la superficie en ese punto, es decir, la primera derivada de la superficie en ese punto.

En la práctica, cada pixel está rodeado de otros ocho, por lo que no se calcula la pendiente sólo entre esos dos puntos, sino el denominado “mapa de pendientes” en el que se obtienen las pendientes con los ocho vecinos y se escoge el valor medio como la pendiente en ese punto.

Se ha generado el mapa de pendientes a partir del modelo de la zona de alunizaje del Apolo 11 a partir del modelo original, utilizando la herramienta “Análisis MDT”, con las siguientes características de procesamiento:

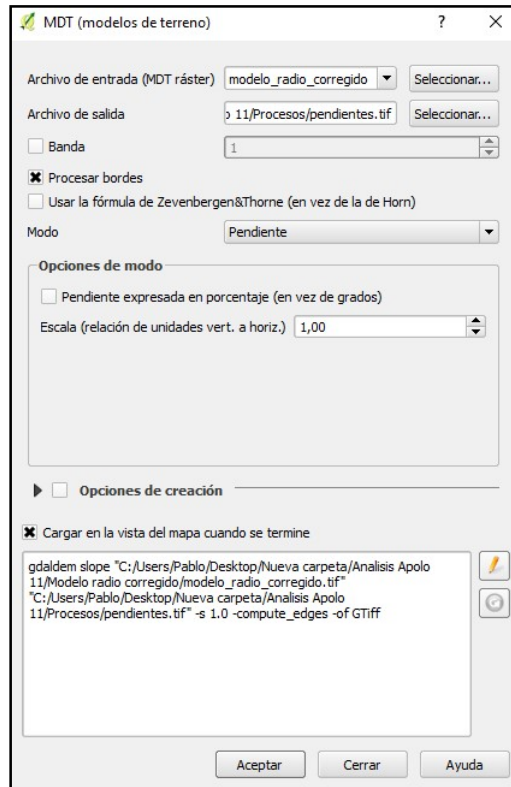


Figura 4.10. Generación del mapa de pendientes

Obteniendo el siguiente resultado:

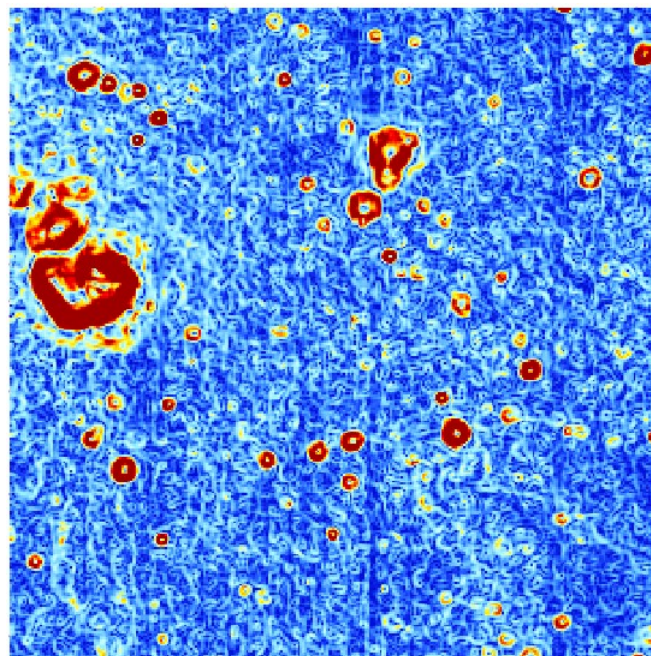


Figura 4.11. Mapa de pendientes

4.2.2.5. Mapa de orientaciones

La idea de orientación de un lugar se define como el azimut hacia el que mira el plano tangente (o plano de máxima pendiente) en ese punto.

Se ha generado el mapa de orientaciones a partir del modelo original, utilizando la herramienta “Análisis MDT”, con las siguientes opciones de procesamiento:

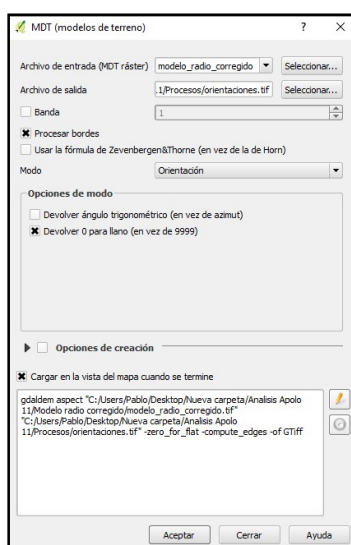


Figura 4. 12. Generación mapa de orientaciones

Obteniendo el siguiente resultado:



Figura 4.13. Mapa de orientaciones

4.2.2.6. Mapa de sombras

Otra posibilidad de representar el relieve es mediante un mapa de sombras. En este caso la variable representada es una simulación de nivel de luz reflejado por el relieve al ser iluminado por el sol en una posición determinada. Esta cantidad de luz depende de la posición del sol y de la pendiente del relieve.

Se ha realizado el sombreado de relieve utilizando la herramienta “Análisis MDT”, con las siguientes opciones de procesamiento:

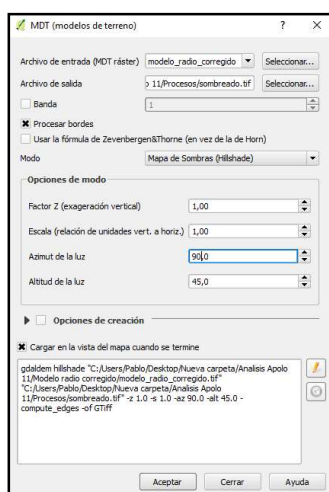


Figura 4.14. Generación mapa de sombras

Obteniendo el siguiente resultado:

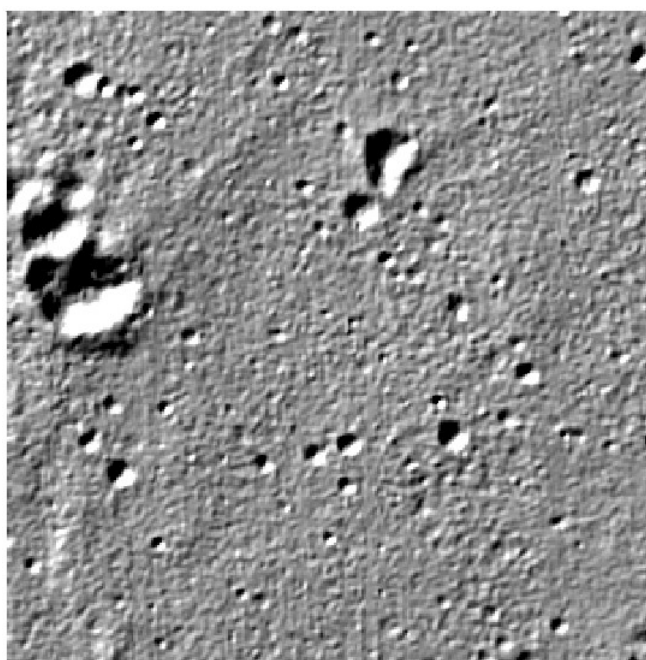


Figura 4.15. Mapa de sombras

4.2.2.7. Cuenca visual

Este proceso permite establecer los puntos del mapa que son visibles desde un punto concreto, que en este caso será el lugar donde se posó el módulo lunar.

Para ello, hay que tener en cuenta que todos los píxeles tienen diferentes alturas y que en algunos casos estas alturas pueden ocultar otra porción del relieve al observador.

De manera que se ha utilizado el modelo filtrado obtenido en el paso previo a la obtención del curvado, para así evitar diferencias significativas entre píxeles vecinos que obstaculicen la visión desde el punto de observación, obteniendo así una cuenca visual mucho más realista. También se ha calculado suponiendo una altura del punto de observación de 6 metros debido a que el modelo tiene una precisión vertical de 4 metros y suponiendo una altura del observador de 2 metros aproximadamente.

Otro aspecto a tener en cuenta debido a que se va a realizar este proceso sobre la Luna, es la corrección por esfericidad presente en la fórmula del cálculo de la cuenca visual, y que se ha incluido de la siguiente manera.

Como se necesita la distancia de todos los puntos de la zona al punto de alunizaje para realizar la corrección de esfericidad, se ha realizado lo siguiente: se ha cargado una capa shape que contiene un punto localizado en el punto exacto donde alunizó el Apolo 11, y se ha rasterizado dicho punto. Con este punto rasterizado se ha creado un raster de distancia a dicho punto con una extensión igual a la del modelo (ver Figura 4.16), de manera que cada pixel de este nuevo raster contiene como información la distancia al punto de alunizaje.

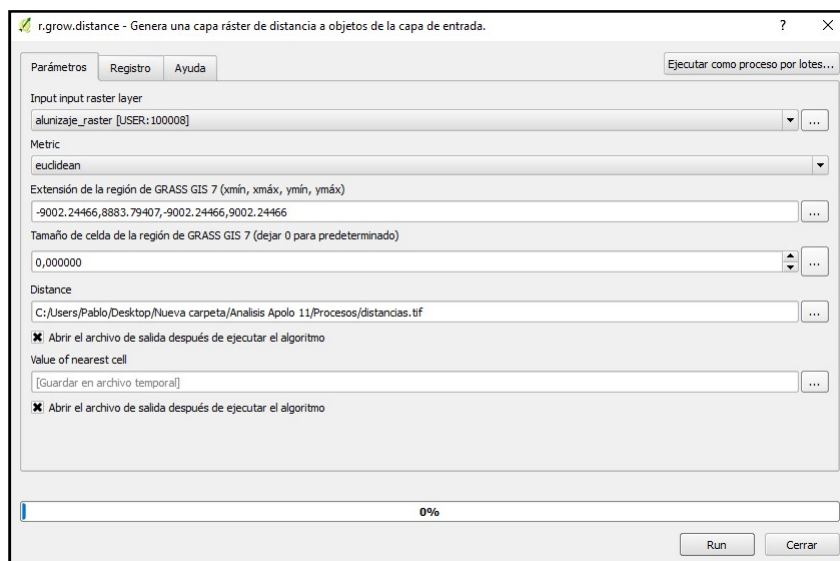


Figura 4.16. Generación raster de distancia

Obteniendo el siguiente resultado:

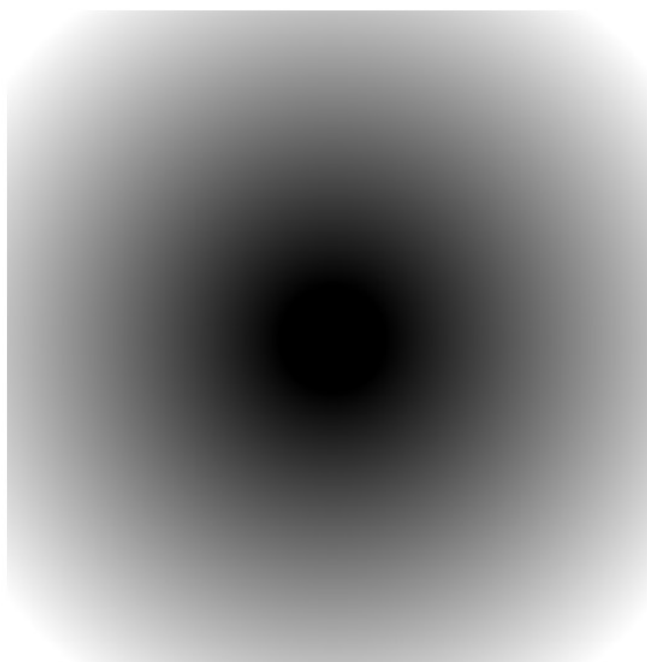


Figura 4.17. Raster de distancia

Una vez hecho esto, se ha corregido la esfericidad lunar del modelo original. Para ello se ha utilizado la calculadora raster (ver Figura 4.18), en la que se implementa la formula de corrección de esfericidad: $MDE\ original - (Dist^2/1730000)$.

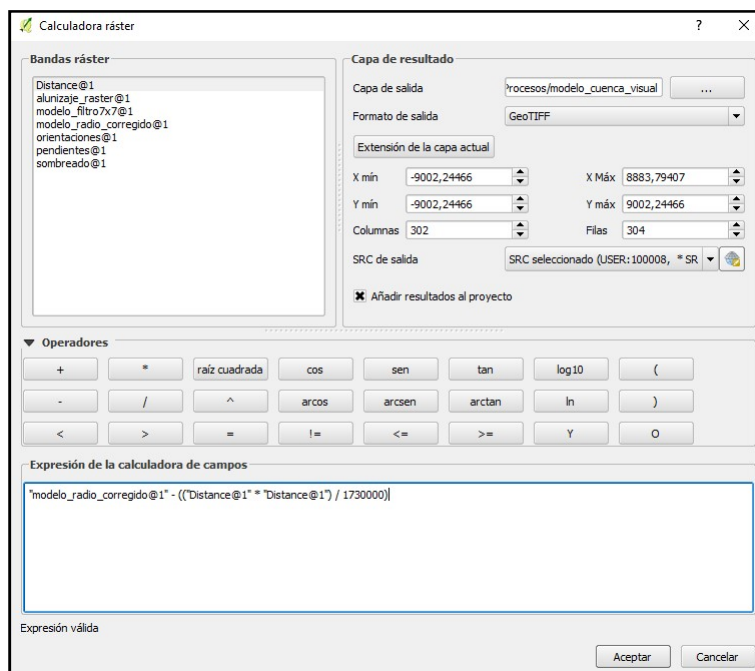


Figura 4.18. Corrección de esfericidad lunar

Con el modelo corregido de esfericidad lunar, se ha procedido a aplicar el algoritmo para calcular la cuenca visual (ver Figura 4.19).

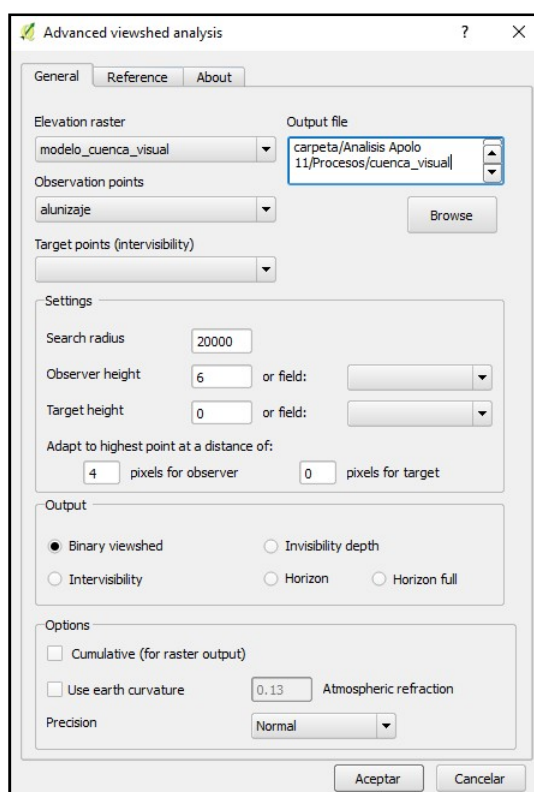


Figura 4.19. Generación cuenca visual

El resultado obtenido es el siguiente:

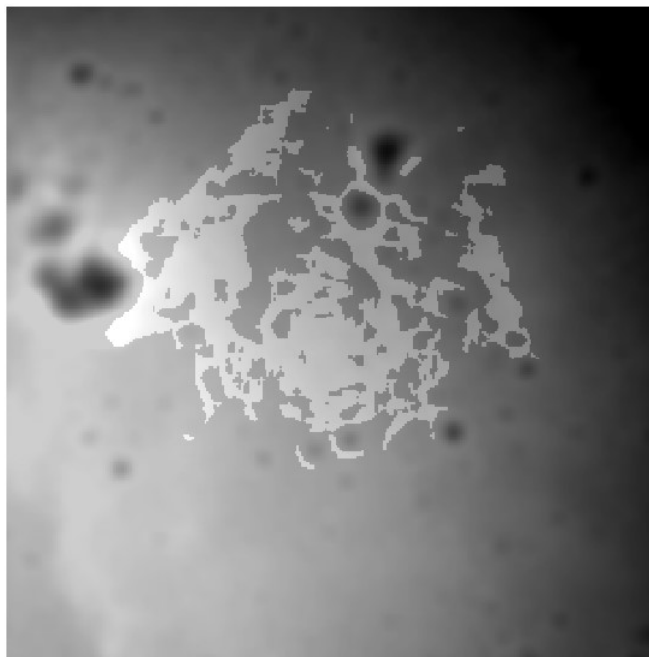


Figura 4.20. Cuenca visual

4.2.2.8. Perfiles topográficos

Para obtener los perfiles topográficos se ha creado una capa shape de elementos lineales y en la cual se han creado 4 líneas de direcciones Oeste-Este, Noroeste-Sureste, Norte-Sur y Noreste-Suroeste (ver Figura 4.21).

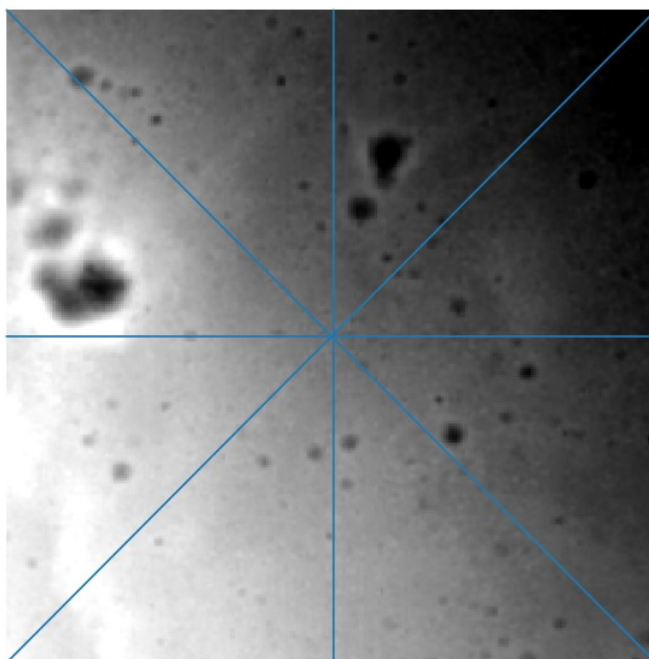


Figura 4.21. Perfiles topográficos

Para obtener los perfiles se ha utilizado el software GvSIG con la herramienta “Perfil” en la que se ha utilizado el modelo original como elemento al que se le va a calcular los perfiles y la capa shape con las direcciones de los perfiles (ver Figura 4.22).

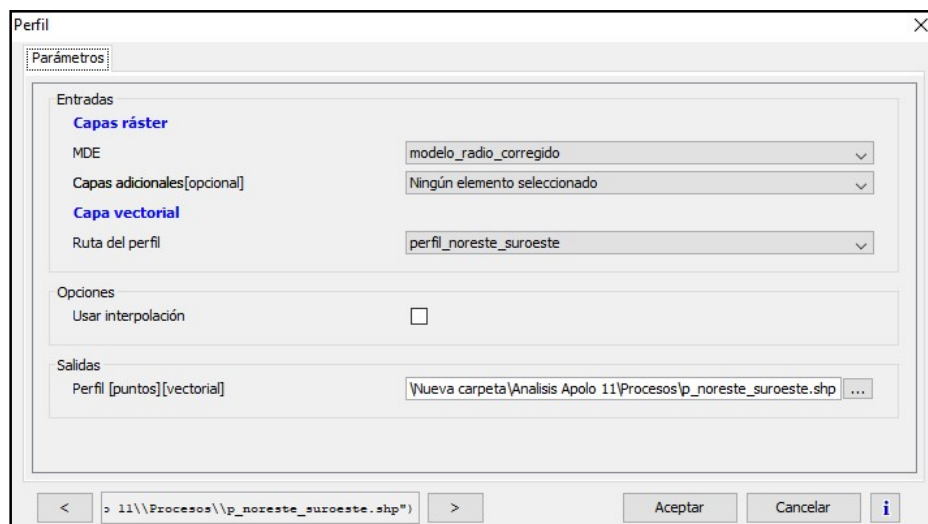


Figura 4.22. Generación de perfiles

Obteniendo así los perfiles topográficos:

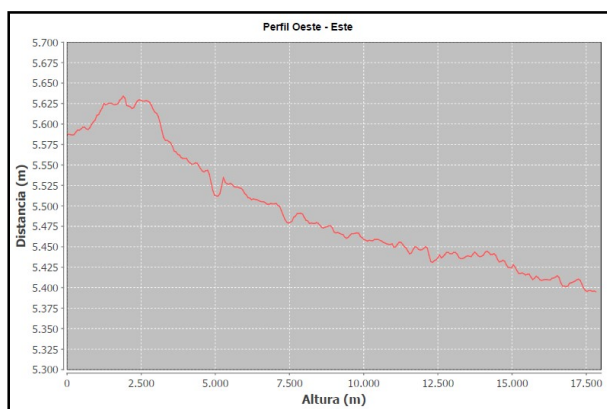


Figura 4.23. Perfil Oeste-Este

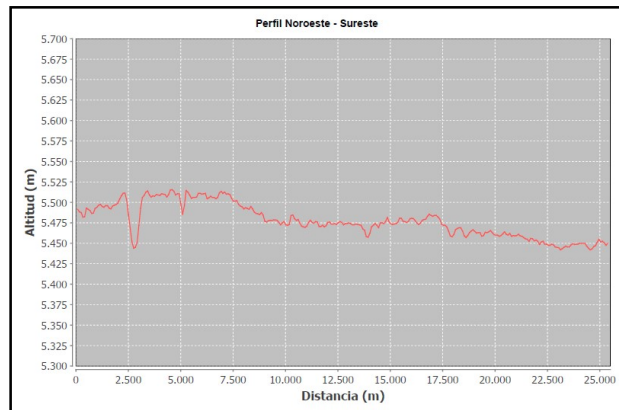


Figura 4.24. Perfil Noroeste-Sureste

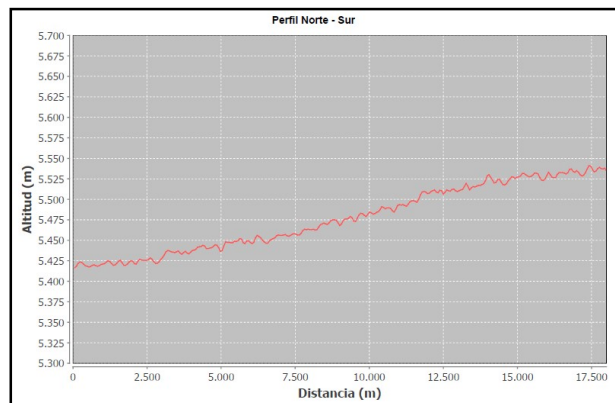


Figura 4.25. Perfil Norte-Sur

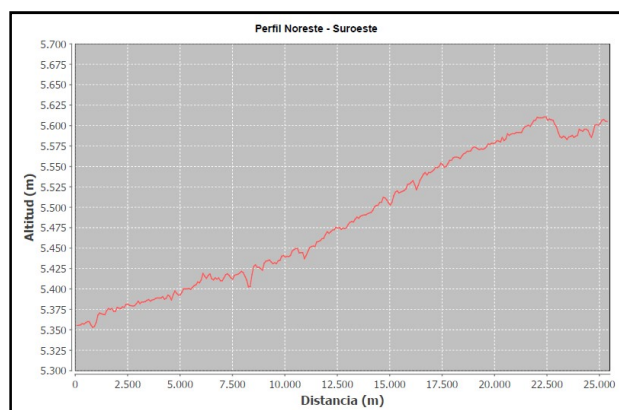


Figura 4.26. Perfil Noreste-Suroeste

4.2.3. Realización de la cartografía

Se ha llevado a cabo la realización de tres tipos de mapas topográficos a diferentes escalas para cada una de las zonas de alunizaje, que sirvan de apoyo al análisis realizado.

El sistema de referencia utilizado en los tres tipos de mapas es el “Moon 2000”, que utiliza un esferoide de 1.737.400 metros de radio, y cuyo sistema de coordenadas utilizado para localizar elementos sobre la superficie lunar es el sistema de coordenadas selenográficas.

De manera análoga al sistema de coordenadas geográficas utilizado en la Tierra, las coordenadas selenográficas están definidas por la latitud y la longitud selenográfica expresadas en grados sexagesimales.

La latitud selenográfica en un punto lunar se define como el ángulo entre el plano ecuatorial lunar y la línea que pasa por dicho punto y el centro de la Luna. El ecuador es el paralelo 0° y divide la Luna en Norte y Sur, así el polo norte lunar es 90° N y el polo Sur 90° S. En el esferoide lunar 1° equivale a 30,323 kilómetros.

La longitud selenográfica en un punto lunar se define como el ángulo entre el meridiano de referencia y el meridiano que pasa por el punto. El meridiano de referencia lunar está establecido teóricamente en el centro de la cara visible de la Luna. Pero la posición de este punto varía debido al movimiento de libración, movimiento de oscilación que presenta la Luna respecto a un observador en la Tierra debido a que la Tierra no está exactamente en el centro de la órbita lunar, a que su eje de rotación está inclinado con respecto al plano de su órbita y a que la rotación terrestre hace que el punto de vista de un observador en la Tierra no sea siempre el mismo. Por lo tanto, se ha definido un punto origen de coordenadas, este punto es el centro del cráter “Mösting A”.

Los tres tipos de mapas realizados para cada zona de alunizaje son los siguientes:

4.2.3.1. Mapa a escala 1:200.000

La finalidad de este mapa es la de representar una zona amplia de terreno alrededor del alunizaje de cada misión para comprender mejor la topografía global de cada zona, y relacionar los motivos que llevaron a la NASA a elegir estas zonas con la representación del relieve.

Se ha realizado en formato A3 representando una extensión de terreno de 65 x 47,4 kilómetros centrada en el lugar de alunizaje de cada misión.

Se ha usado la proyección Transversa de Mercator (Moon Transverse Mercator, IAU: 30165) centrada en el lugar de alunizaje para minimizar la distorsión. Se trata de una proyección cilíndrica conforme, no provoca deformación en los ángulos. Al ser transversa, el cilindro es longitudinal al ecuador lunar. El cilindro es secante a la esfera, por lo que hay dos líneas paralelas equidistantes del meridiano central que mantienen la escala.

Solo los meridianos secantes y el ecuador son líneas rectas. Los demás meridianos y paralelos son curvas complejas. En el caso de este mapa la cuadrícula sí que se han representado como rectas ortogonales previa comprobación de que la deformación en los extremos del mapa es inferior al límite de percepción visual a esta escala.

Para ello, se ha calculado la deformación en la esquina superior derecha del mapa (punto C). Se ha calculado las coordenadas selenográficas de este punto a partir del punto central de alunizaje (punto O) y la extensión de terreno que abarca el mapa, y se han planteado las ecuaciones de la proyección para calcular sus coordenadas cartesianas equivalentes. La diferencia de las coordenadas cartesianas calculadas con las coordenadas cartesianas teóricas es la diferencia debido a la deformación que provoca esta proyección. De manera que:

$$x = R K \arctan B$$

$$y = R K \left[\arctan \left[\frac{\tan \phi}{\cos(\lambda - \lambda_0)} \right] - \phi_0 \right]$$

Donde:

$$R = 1737400 \text{ metros}$$

$$K = 0.9996$$

$$B = \cos \phi \operatorname{sen} (\lambda - \lambda_0)$$

Y las coordenadas selenográficas de los puntos son:

Punto	ϕ [grados]	λ [grados]
C	1,45574	24,54493
O	0,67416	23,47314

Luego:

$$x_c = 32471,100 \text{ metros}$$

$$y_c = 23698,362 \text{ metros}$$

Obteniendo unas diferencias con las coordenadas teóricas de:

$$\Delta_x = 32500 - x_c = 29,900 \text{ metros}$$

$$\Delta_y = 23700 - y_c = 1,638 \text{ metros}$$

Comparando estas diferencias con un límite de apreciación visual de 0.2 mm a escala 1:200.000 (40 metros) se demuestra que las deformaciones provocadas por esta proyección son tolerables para la realización de una cuadrícula ortogonal en este mapa.

Se ha utilizado esta proyección por las pocas distorsiones que provoca en cartografías a escalas que van desde 1:25.000 a 1:250.000.

Respecto al contenido del mapa, se ha usado un sombreado del relieve como mapa base generado a partir del modelo digital de elevaciones obtenido de MAP2, en el que se ha superpuesto un curvado para la interpretación del relieve.

4.2.3.2. Mapa a escala 1:25.000

La finalidad de este mapa es la de representar los alrededores del punto de alunizaje con un nivel de detalle mayor que en la cartografía 1:200.000.

Se ha realizado en formato A3 representando una extensión de terreno de 8,125 x 5,925 kilómetros centrada en el lugar de alunizaje de cada misión.

Se ha usado la proyección Moon Equidistant Cylindrical (IAU:30110) centrada en el lugar de alunizaje para minimizar la distorsión. Se trata de una proyección cilíndrica en la que la X es la longitud selenográfica y la Y la latitud selenográfica. Los paralelos y meridianos son líneas rectas equidistantes y ortogonales, donde el paralelo estándar es la única línea que conserva la escala.

Se ha utilizado esta proyección para esta cartografía debido a su sencillez y a que para escalas lo suficientemente grandes se reducen mucho las distorsiones que provoca.

Respecto al contenido del mapa, se ha usado un mosaico de imágenes procedentes de pares estereoscópicos capturados por las cámaras NAC (NACL y NACR) a bordo del LRO con una resolución de 1.4 metros/pixel, en el que se ha superpuesto un curvado generado a partir del modelo digital de elevaciones obtenido de MAP2 para la interpretación del relieve.

4.2.3.3. Mapa a escala 1:5.000

La finalidad de este mapa es la de representar los alrededores más inmediatos del punto de alunizaje con un nivel de detalle mayor que en la cartografía 1:25.000, de manera que se pueda apreciar con todo detalle lo que los astronautas vieron en el momento de alunizar.

Se ha realizado en formato A3 representando una extensión de terreno de 1,625 x 1,185 kilómetros centrada en el lugar de alunizaje de cada misión.

Al igual que en la cartografía 1:25.000 y por los mismos motivos se ha usado la proyección Moon Equidistant Cylindrical (IAU:30110) centrada en el lugar de alunizaje.

Respecto al contenido del mapa, se ha usado una ortofotografía de la zona generada a partir del procesamiento de pares estereoscópicos capturados por las cámaras NAC (NACL y NACR) a bordo del LRO, con una resolución de 0.5 metros/píxel, en el que se ha superpuesto un curvado generado a partir del modelo digital de elevaciones obtenido de estos pares estereoscópicos con una resolución de 2 metros/píxel.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. Zona de alunizaje Apolo 11

Área de estudio

El área de estudio abarca una región de 18 x 18 kilómetros de extensión ubicada entre los 0° 58' y los 0° 23' de latitud Norte y entre los 23° 10' y los 23° 46' de longitud Este, en cuyo centro se encuentra el punto de alunizaje del módulo lunar de la misión Apolo 11 (ver Figura 5.1).

La zona se encuentra en el Mare Tranquilitatis (Mar de la Tranquilidad), un extenso mar lunar cuyo relieve se caracteriza por ser relativamente llano. Este mar ocupa una gran cuenca de aproximadamente 300.000 km², formada por un importante impacto en la época Pre-Nectarian, hace más de cuatro billones de años, y rellenada posteriormente, en la época Imbriam, hace tres y medio billones de años, por flujos sucesivos de lava basáltica.

En cuanto a condiciones del relieve, esta zona se eligió debido a tres características principales: suavidad del terreno (sin grandes cráteres), sin grandes desniveles y tener una pendiente inferior a 2 grados. En el análisis que se ha realizado se pone de manifiesto estas características.

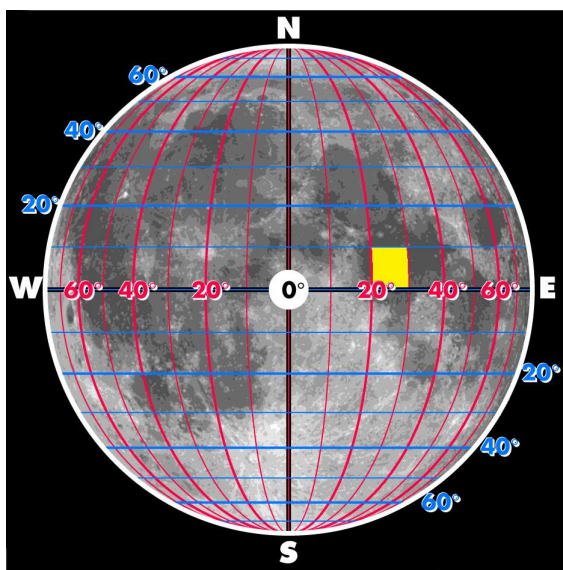


Figura 5.1. Localización área de estudio Apolo 11

Parámetros estadísticos

Las altitudes del área de estudio están comprendidas entre los 5.308 y los 5.637,500 metros sobre el radio medio lunar de 1.730.000 metros considerado en este trabajo, por lo que todas las altitudes de esta zona están comprendidas en un rango de 329,500 metros. Observando la desviación estándar y el coeficiente de variación se puede apreciar que esta zona es bastante uniforme en cuanto a altitud del terreno ya que no existen grandes diferencias respecto a la altitud media de la zona (ver Tabla 5.1).

Máximo [m]	Mínimo [m]	Media [m]	Mediana [m]
5637,500	5308,000	5483,666	5473,500

Rango [m]	Desviación estándar [m]	Coeficiente de variación [%]
329,500	66,433	1,211

Tabla 5.1. Estadísticos descriptivos Apolo 11

También se observa en el histograma de elevaciones (ver Figura 5.2) que la mayoría de los puntos de la zona de estudio se encuentran entre los 5.400 y los 5.500 metros de altitud.

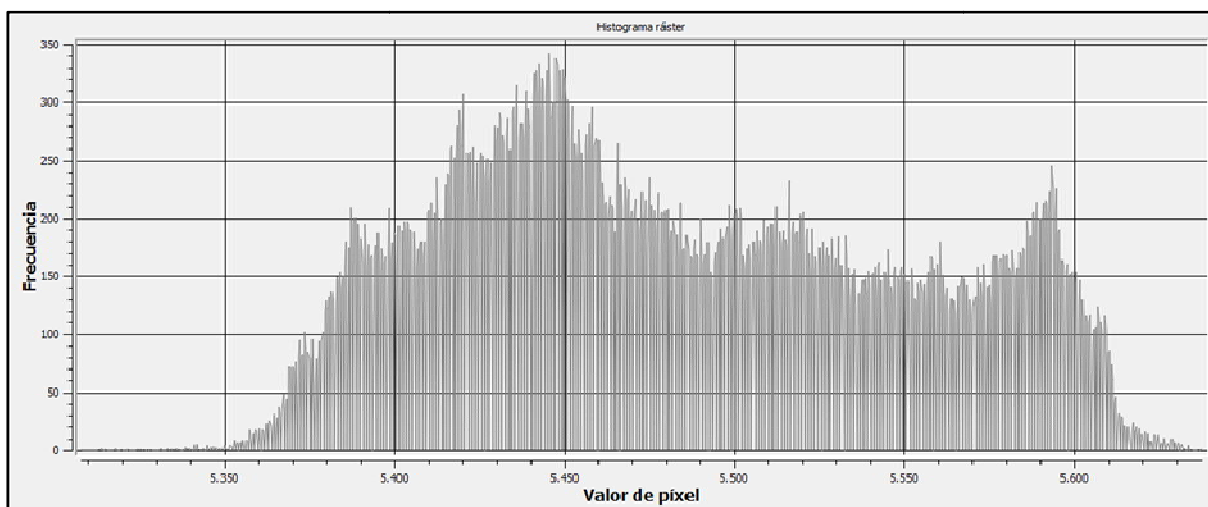


Figura 5.2. Histograma de elevaciones Apolo 11

Mapa de curvas de nivel

Con la representación del curvado con una equidistancia de 20 metros sobre el modelo digital de elevaciones del área de estudio (ver Figura 5.3), se puede observar como la altitud del terreno decrece en sentido Noreste, donde los valores alcanzan los mínimos de la zona y en el extremo opuesto, en la esquina Suroeste, los valores máximos.

También se observa la profundidad de los cráteres más grandes de la zona, como el situado en la parte Oeste, que llega a alcanzar los 5.400 metros de profundidad y un desnivel con el borde de 160 metros.

De acuerdo con los criterios de selección de la zona para esta misión, predomina la suavidad en el terreno, sin grandes cráteres en la zona de alunizaje (zona central), y sin grandes desniveles.

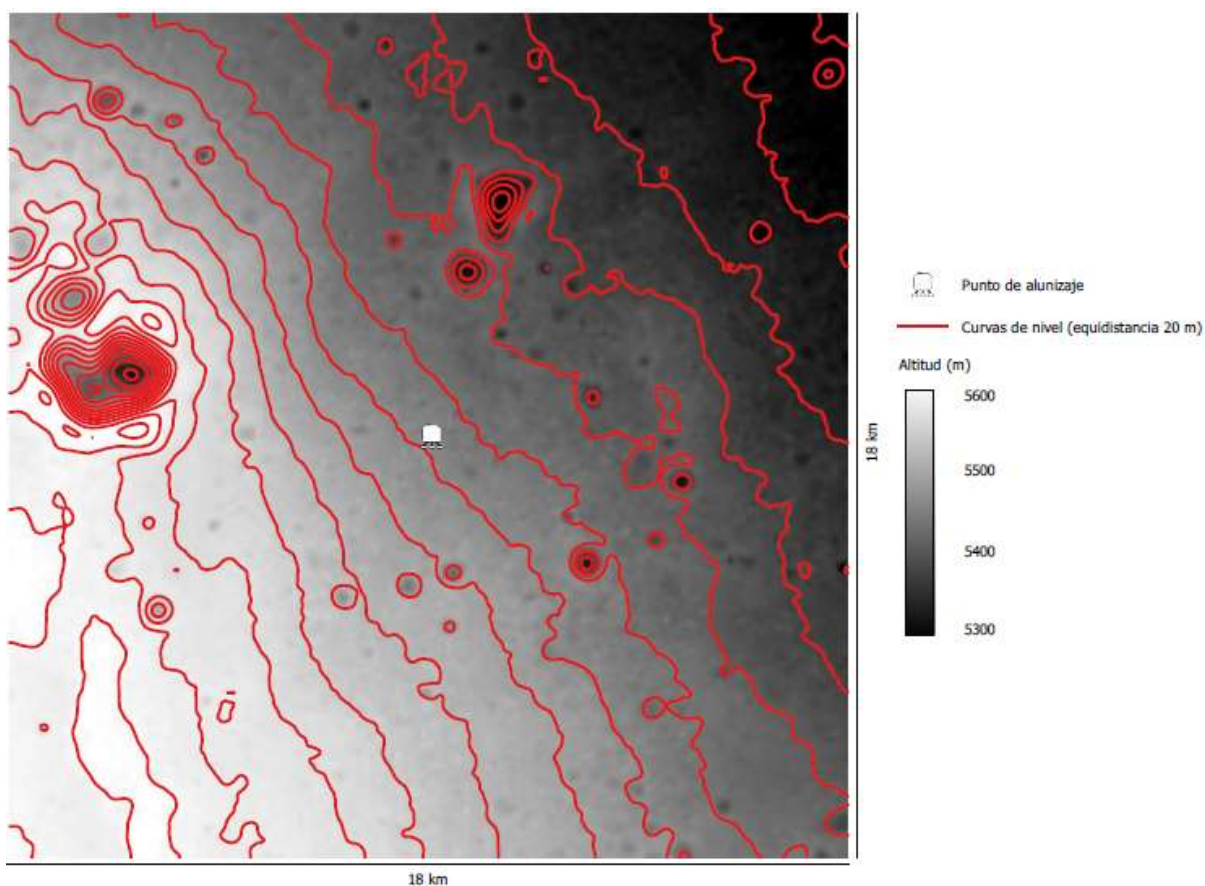


Figura 5.3. Mapa de curvas de nivel Apolo 11 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de pendientes

Con la representación de la pendiente se pone de manifiesto principalmente los cráteres de impacto de meteoritos sobre la superficie lunar donde se llegan a alcanzar pendientes del 20%. El resto de la zona se mantiene constante con pendientes entre el 0% y el 5% (ver Figura 5.4).

Cumpliendo con otro de los criterios de selección de esta misión, la pendiente en la zona central de alunizaje permanece inferior al 1%.

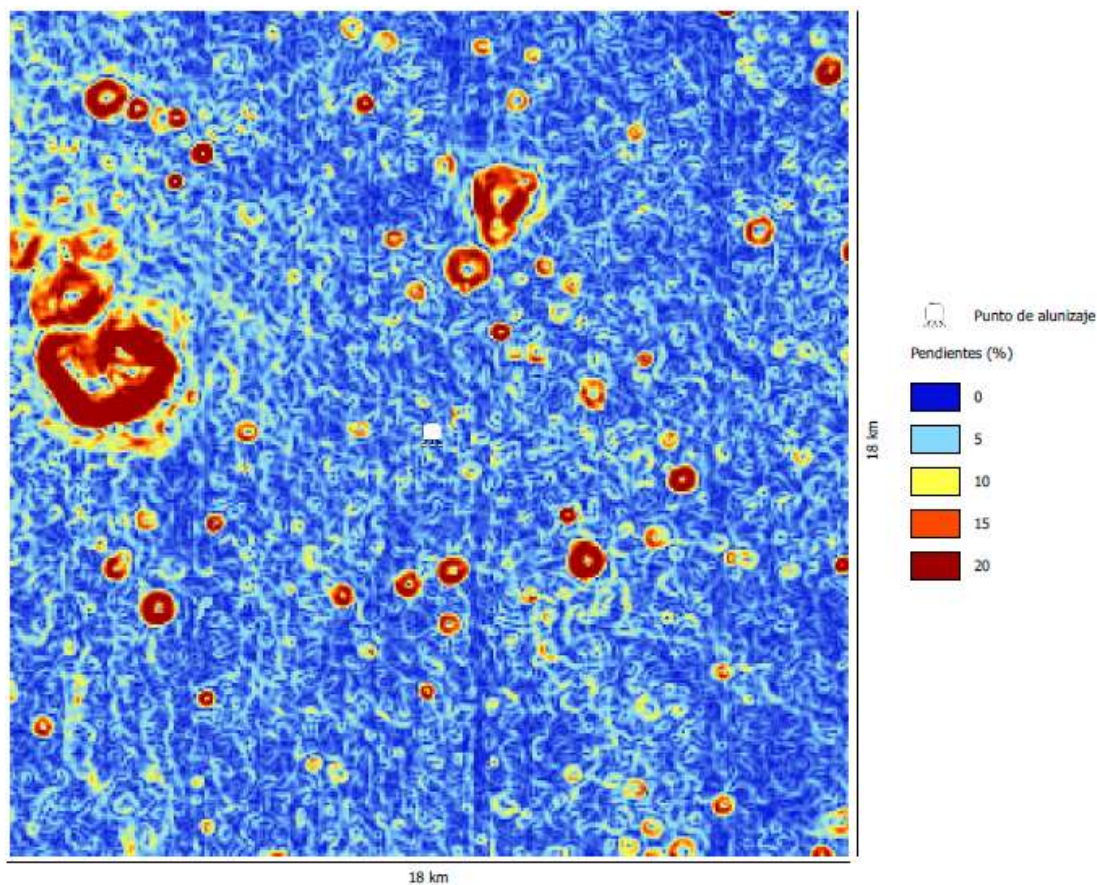


Figura 5.4. Mapa de pendientes Apolo 11 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de orientaciones

Con el mapa de orientaciones se representa el azimut hacia el que mira el plano de máxima pendiente (plano tangente) en cada punto. En el caso de la zona del Apolo 11 (ver Figura 5.5) lo que más se observa son los cráteres de impacto. El resto de la zona no se aprecia una orientación predominante debido a la irregularidad de la superficie por el impacto de pequeños objetos estelares, que la ausencia de atmosfera en la Luna no puede frenar, y que la falta de erosión hace que permanezcan invariables en el tiempo.

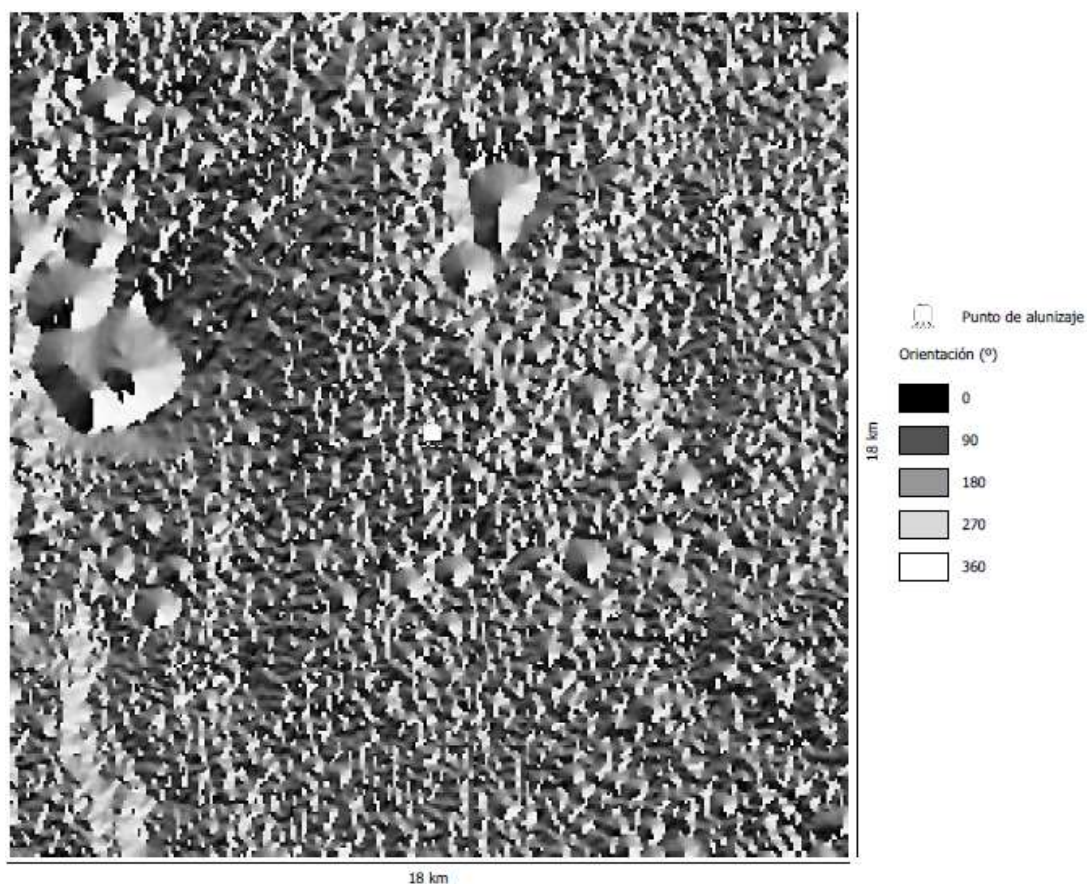


Figura 5.5. Mapa de orientaciones Apolo 11 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de sombras

En el mapa de sombras generado (ver Figura 5.6) se ha simulado un azimut de la fuente de luz (Sol) de 315° y una altitud de 45° .

Se aprecia que en la zona no hay formaciones montañosas ni grandes desniveles salvo los grandes cráteres que se distinguen perfectamente por la sombra simulada, y que no están en la zona central de alunizaje. Condiciones estas, imprescindibles para cumplirlos objetivo de la misión Apolo 11.

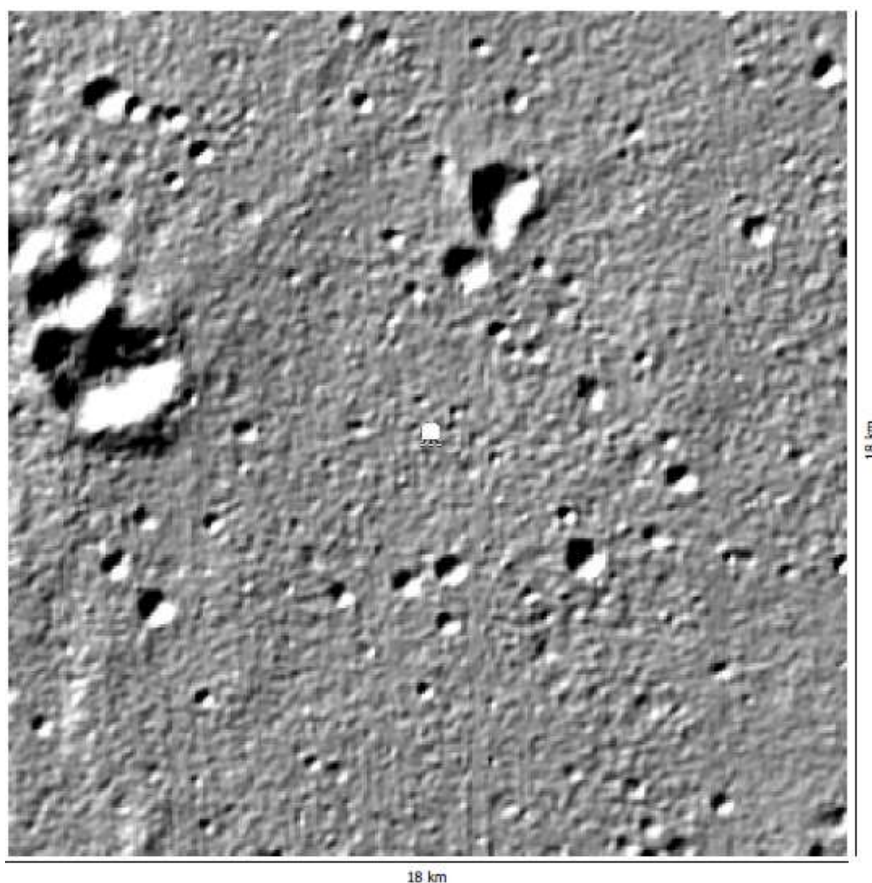


Figura 5.6. Mapa de sombras Apolo 11 (escala aproximada 1:178.500)

Cuenca visual

En el cálculo de la cuenca visual (ver Figura 5.7) desde el punto de alunizaje se puede observar la extensión de terreno que sería visible desde dicho punto para

una altura de un observador de 2 metros aproximadamente, simulando así lo que vería los astronautas Neil Armstrong y Buzz Aldrin cuando pisaron la Luna por primera vez.

Las zonas visibles están representadas por un tono más claro sobre el modelo digital de elevaciones. Se observa como en la zona central de alunizaje todo el terreno es visible en un radio de 1 km. A partir de ahí, empiezan a aparecer zonas no visibles que se corresponden con el fondo de cráteres de impacto. Estas zonas se corresponden aproximadamente con la imagen panorámica captada por los astronautas desde la misma zona (ver Figura 5.8).

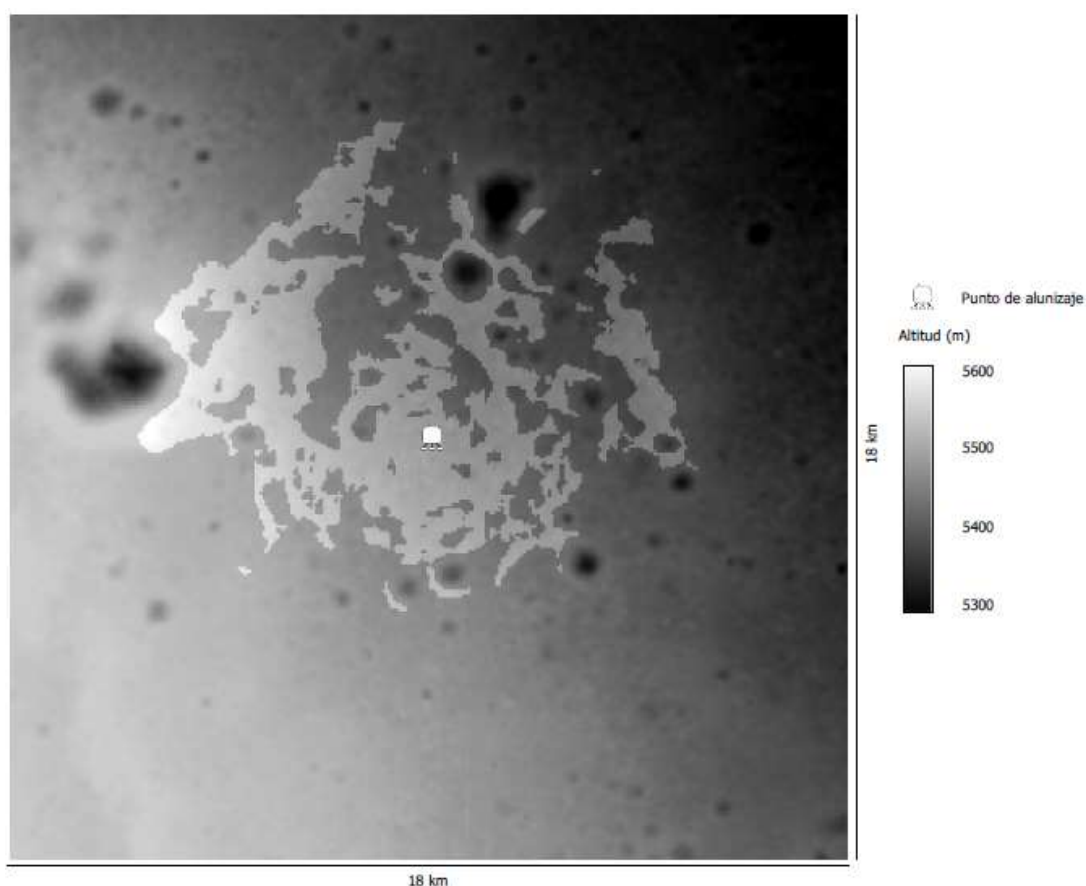


Figura 5.7. Cuenca visual Apolo 11. En tono claro las zonas visibles desde el punto de alunizaje (escala aproximada 1:178.500)



Figura 5.8. Imagen panorámica Apolo 11

Perfiles topográficos

Se han trazado cuatro perfiles en las direcciones Oeste-Este, Noroeste-Sureste, Norte-Sur y Noreste-Suroeste (ver Figura 5.9), en los que se observa perfectamente el relieve de la zona.

El terreno tiende a ganar altitud en el sentido Noreste como se puede apreciar en el perfil Noreste-Suroeste y también en el perfil Norte-Sur. También se puede ver la profundidad de los cráteres que son cortados por el perfil como es el caso del inicio del perfil Noroeste-Sureste o el incremento de altitud en el borde de uno de ellos en el perfil Oeste-Este

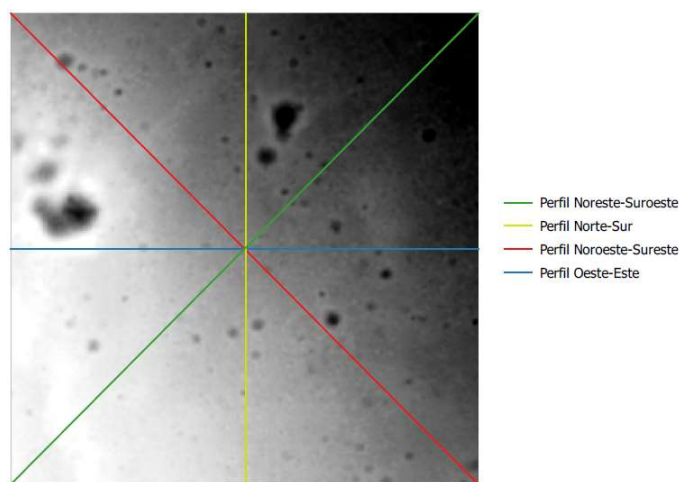
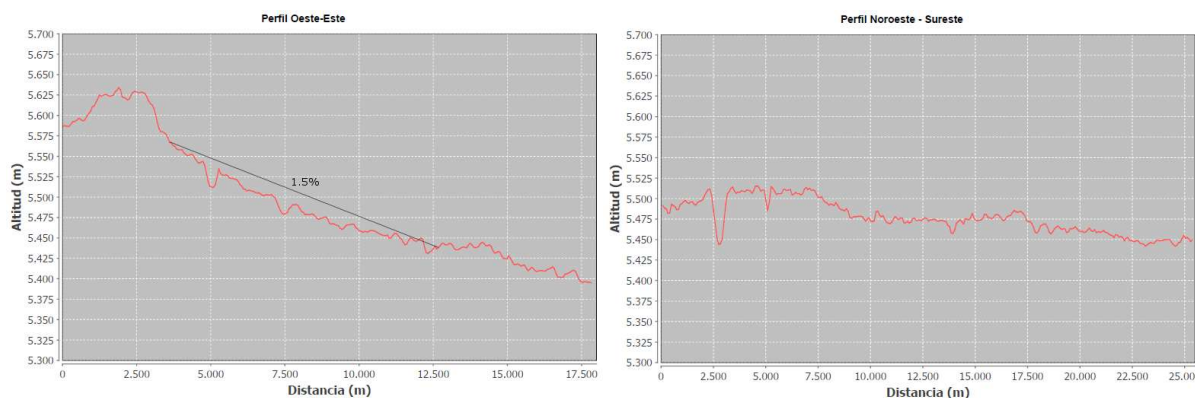
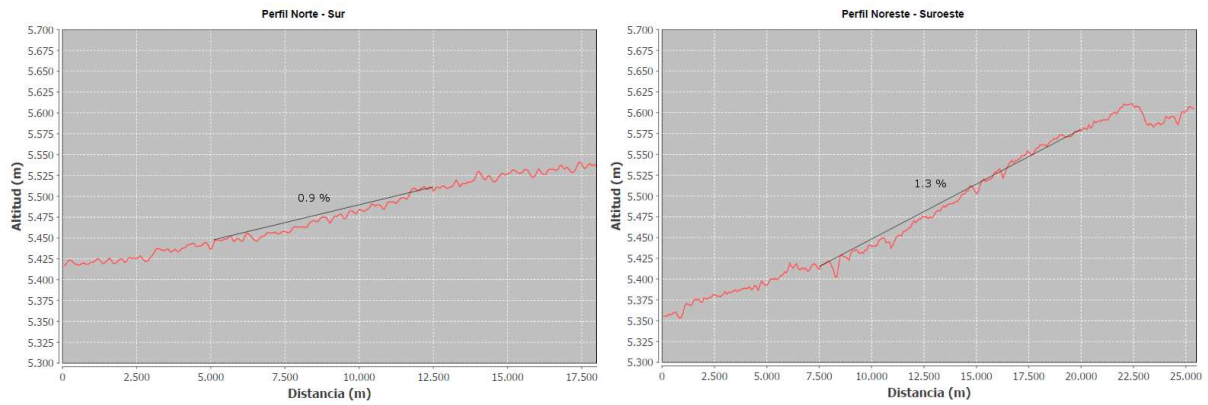


Figura 5.9. Perfiles topográficos Apolo 11





Como apoyo a este analisis se recomienda ver los mapas topograficos de la zona Apolo 11 en el “Anexo 1. Cartografía de las zonas de alunizaje”.

5.2. Zona de alunizaje Apolo 12

Área de estudio

El área de estudio abarca una región de 18 x 18 kilómetros de extensión ubicada entre los 2° 43' y los 3° 19' de latitud Sur y entre los 23° 8' y los 23° 43' de longitud Oeste, en cuyo centro se encuentra el punto de alunizaje del módulo lunar de la misión Apolo 12 (ver Figura 5.10).

Esta área está localizada en el Oceanus Procellarum (Océano de las Tormentas), el mayor de los mares lunares cubriendo una superficie aproximada de 1.692.000 km². Una zona caracterizada por un relieve poco característico que facilitara un alunizaje de precisión.

Este Océano se formó por antiguas corrientes de lava basáltica. Una de las teorías acerca de su formación, a partir de los datos obtenidos por la misión Grail de la Nasa, explica que esta gran cuenca no pudo ser formada por el impacto de una roca espacial, como se creía hasta ahora, sino que surgió de una gran columna de magma del interior del satélite.

La elección de esta zona como lugar de alunizaje del Apolo 12 se hizo bajo el enfoque aun conservador de la NASA, pensando más en realizar un alunizaje de exitoso que en el interés geológico de la zona. De ahí que la zona se eligiera según los mismos criterios que para la misión Apolo 11, suavidad del terreno, sin grandes desniveles y con una pendiente inferior a 2 grados. Criterios que se ponen de manifiesto en el análisis realizado.

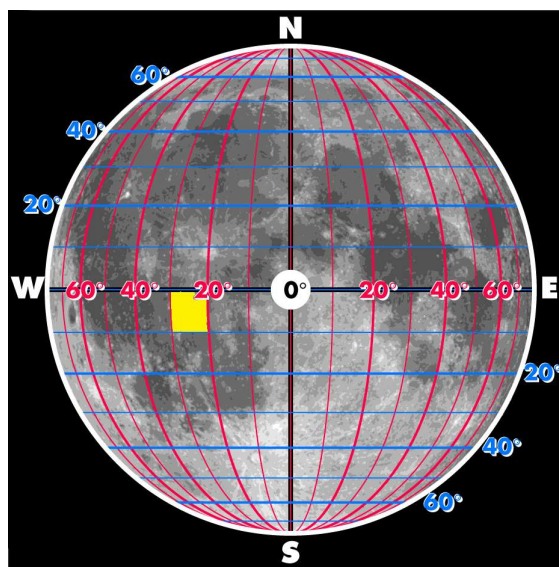


Figura 5.10. Localización área de estudio Apolo 12

Parámetros estadísticos

Las altitudes del área de estudio están comprendidas entre los 5.871 y los 6.041,500 metros sobre el radio medio lunar de 1.730.000 metros, por lo que todas las altitudes de esta zona están comprendidas en un rango de 170 metros. Observando la desviación estándar y el coeficiente de variación se puede apreciar que esta zona es bastante uniforme en cuanto a altitud del terreno ya que no existen grandes diferencias respecto a la altitud media de la zona (ver Tabla 5.2). Estos parámetros estadísticos ponen de manifiesto que la zona escogida para el alunizaje de la misión Apolo 12 era incluso más conservadora que la del Apolo 11.

Máximo [m]	Mínimo [m]	Media [m]	Mediana [m]
6041,500	5871,000	5973,857	5975,500

Rango [m]	Desviación estándar [m]	Coeficiente de variación [%]
170,000	36,974	0,619

Tabla 5.2. Estadísticos descriptivos Apolo 12

Se observa en el histograma de elevaciones (ver Figura 5.11) que la mayor la altitud predominante en esta zona está por encima de los 6.000 metros.

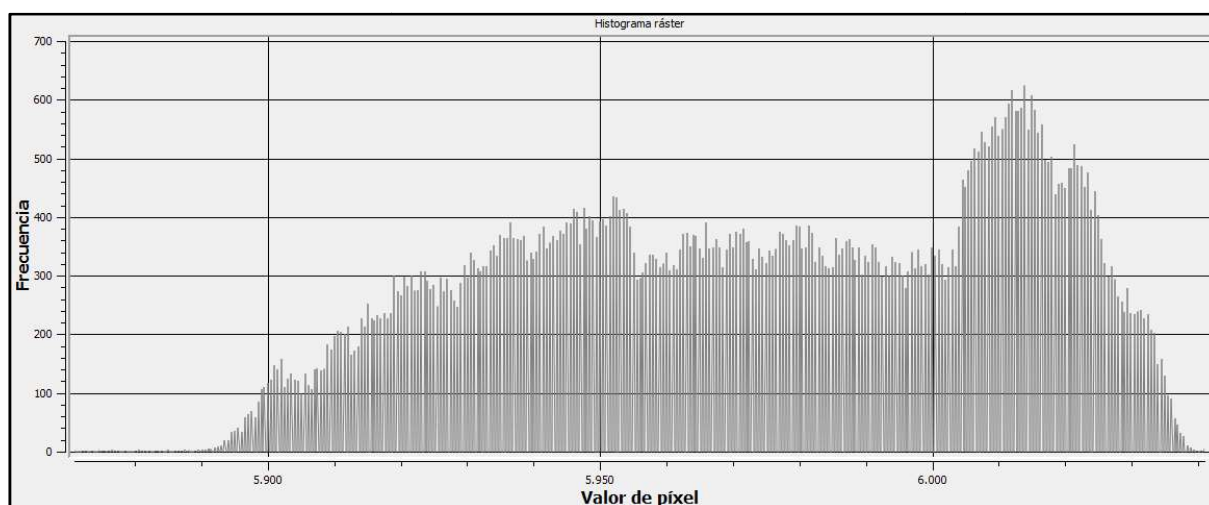


Figura 5.11. Histograma de elevaciones Apolo 12

Mapa de curvas de nivel

Con la representación del curvado con una equidistancia de 20 metros sobre el modelo digital de elevaciones del área de estudio (ver Figura 5.12), se puede observar como la altitud del terreno aumenta en sentido Noreste pero de forma muy suave con una diferencia entre la primera curva de nivel, en la esquina Suroeste y la esquina Noreste, de apenas 120 metros, para una extensión de aproximadamente 25 km.

Como se observa, esta zona cumple con el criterio de no tener grandes desniveles, ni multitud de cráteres en la zona central de alunizaje. De hecho, el desnivel más grande se corresponde con el cráter de la zona centro-norte, que alcanza una profundidad de 60 metros respecto a la superficie.

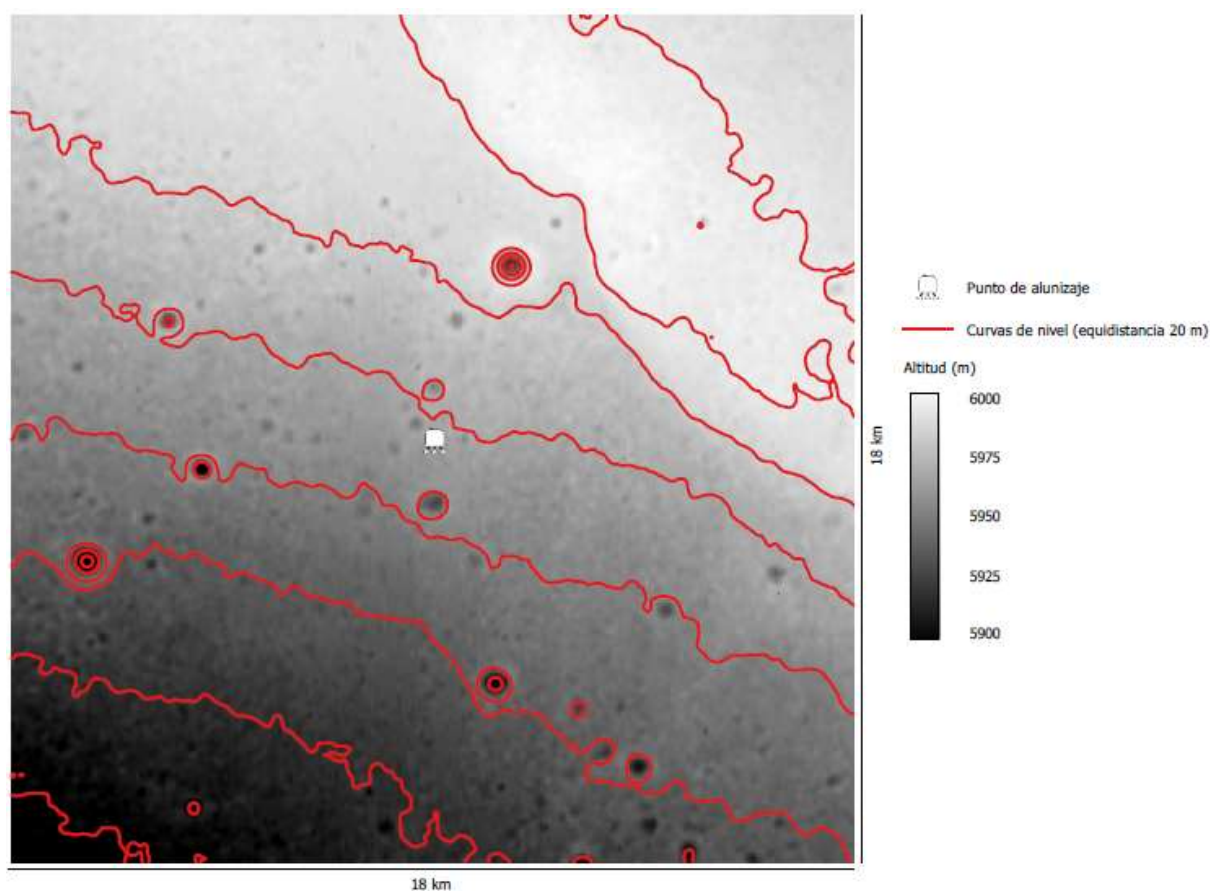


Figura 5.12. Mapa de curvas de nivel Apolo 12 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de pendientes

Con el mapa de pendientes del área de estudio se pone de manifiesto principalmente los cráteres de impacto de meteoritos sobre la superficie lunar donde se alcanzan pendientes del 20%. El resto de la zona se mantiene constante con pendientes del 1% o inferiores (ver Figura 5.13).

Como se observa es una zona prácticamente llana, que cumple con otro de los criterios establecidos para esta misión, el de tener una pendiente inferior a dos grados en la zona de alunizaje.

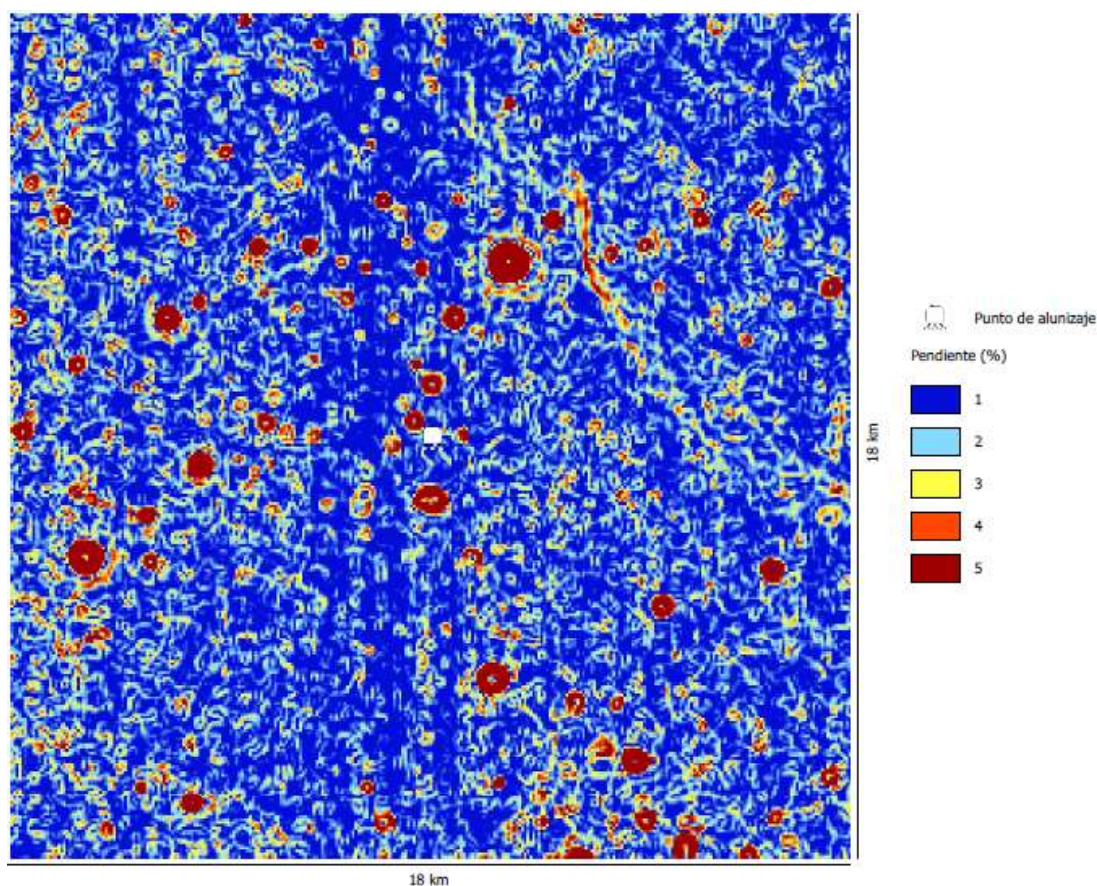


Figura 5.13. Mapa de pendientes Apollo 12 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de orientaciones

Al igual que en el Mar de la Tranquilidad, en esta zona no existe una orientación predominante. Como se puede ver en esta representación de la orientación de cada punto de la zona (ver Figura 5.14) lo que más se observa son los cráteres de impacto. El resto de la zona es una superficie de orientación irregular debido principalmente al impacto de pequeños objetos estelares cuya marca permanece aun hoy día desde que se produjera.

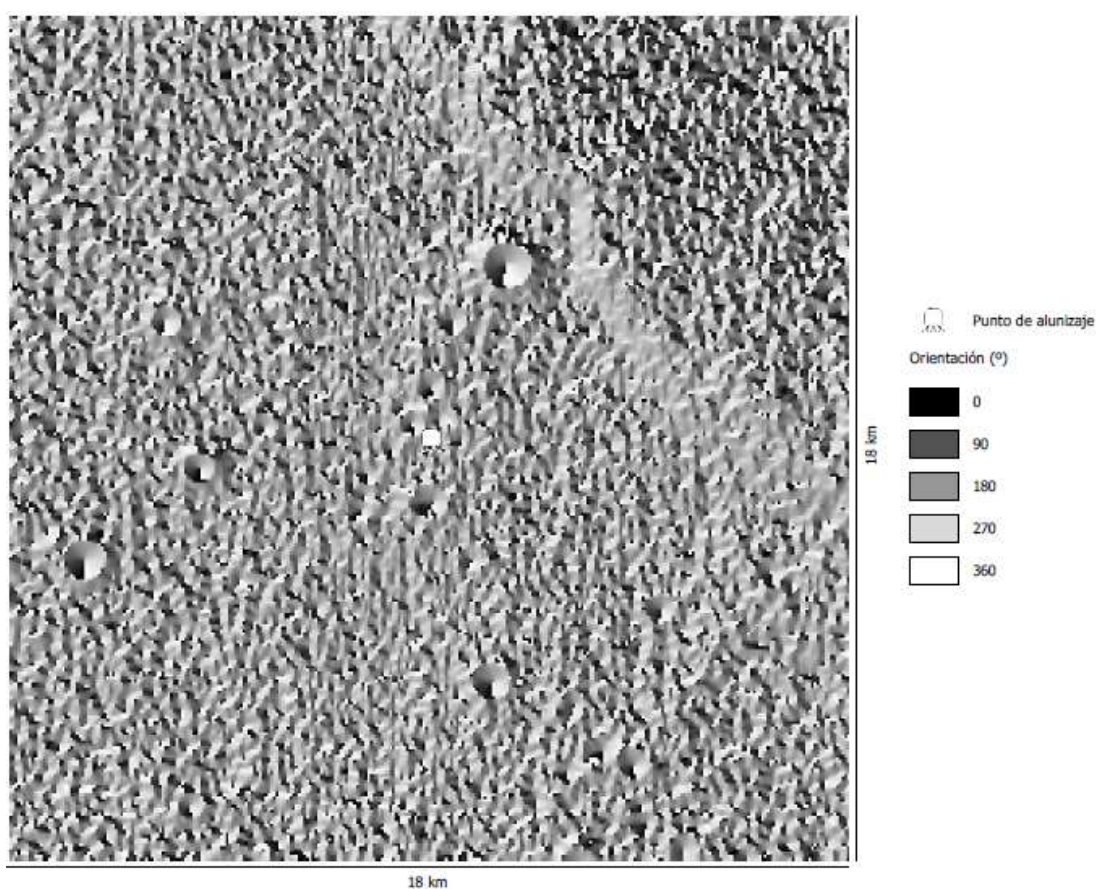


Figura 5.14. Mapa de orientaciones Apolo 12 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de sombras

En el mapa de sombras generado (ver Figura 5.15) se ha simulado un azimut de la fuente de luz (Sol) de 315° y una altitud de 45° .

Se aprecia que en la zona no hay formaciones montañosas ni grandes desniveles salvo los cráteres que se distinguen perfectamente por la sombra simulada.

En general, es una zona sin ningún interés geológico, cumpliendo así los criterios que llevaron a su elección, con el fin de facilitar un alunizaje seguro y que permitiese en posteriores misiones ser más ambiciosos.

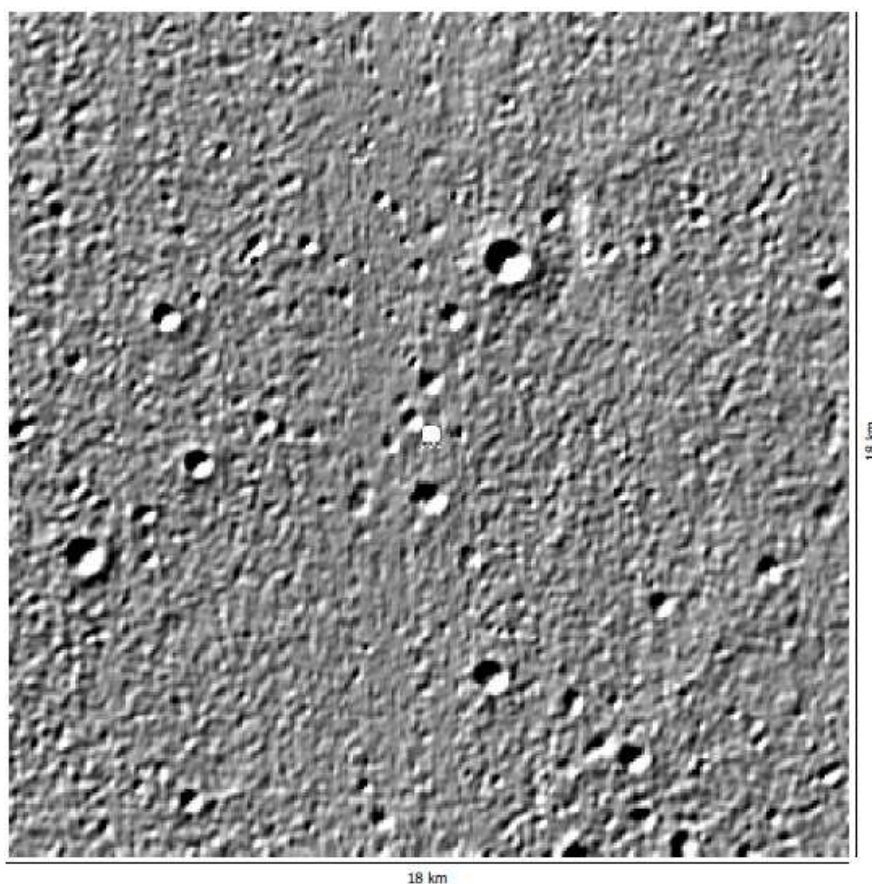


Figura 5.15. Mapa de sombras Apolo 12 (escala aproximada 1:178.500)

Cuenca visual

En el cálculo de la cuenca visual (ver Figura 5.16) desde el punto de alunizaje se puede observar la extensión de terreno que sería visible desde dicho punto para una altura de un observador de 2 metros aproximadamente. Las zonas visibles están representadas por un tono más claro sobre el modelo digital de elevaciones.

Se aprecia que alrededor del punto de alunizaje no hay ningún obstáculo que impidiese la visión.

Estas zonas se corresponden aproximadamente con la imagen panorámica captada por los astronautas desde la misma zona (ver Figura 5.17).

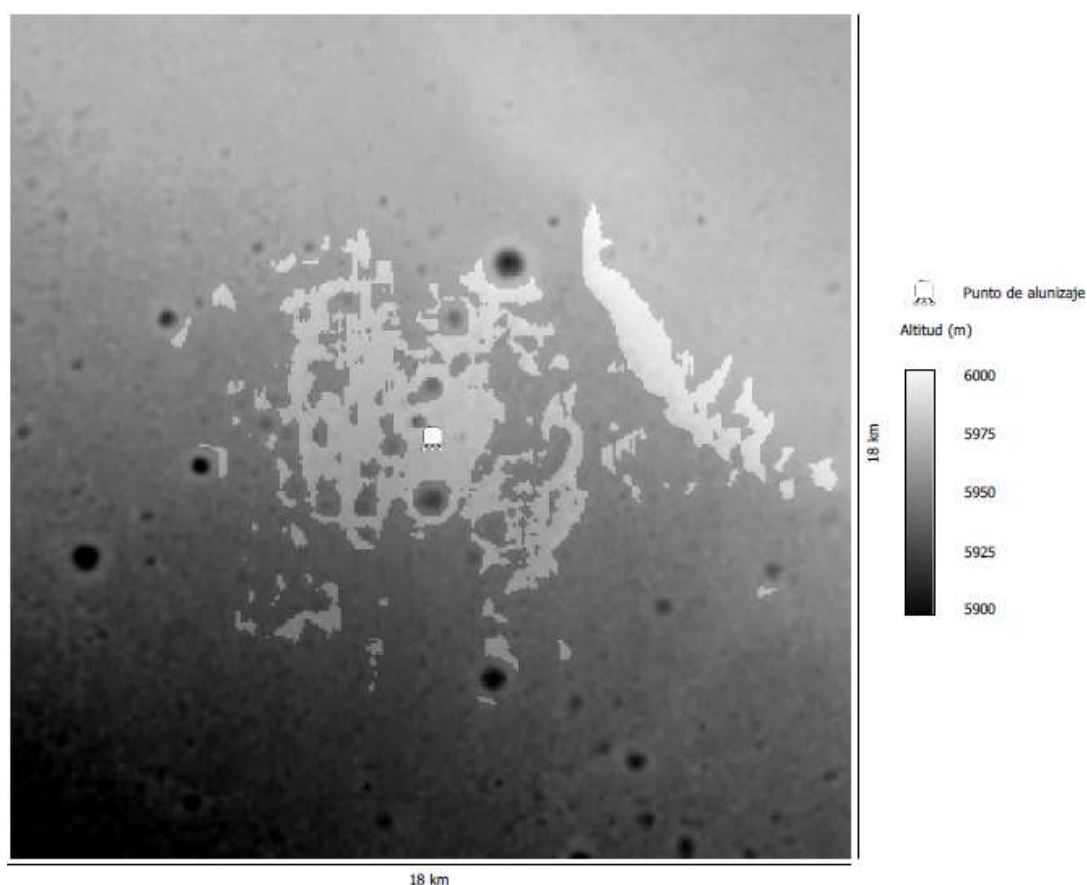


Figura 5.16. Cuenca visual Apolo 12. En tono claro las zonas visibles desde el punto de alunizaje (escala aproximada 1:178.500)



Figura 5.17. Imagen panorámica Apolo 12

Perfiles topográficos

Se han trazado cuatro perfiles en las direcciones Oeste-Este, Noroeste-Sureste, Norte-Sur y Noreste-Suroeste (ver Figura 5.18), en los que se observa perfectamente el relieve de la zona.

A la vista de los perfiles, se observa cómo el terreno aumenta en altitud en sentido Noreste pero sin grandes desniveles. En el perfil Norte-Sur se observa la profundidad de algunos cráteres. Y en el perfil Noreste-Suroeste se puede apreciar una pequeña elevación en el terreno en el sentido Suroeste, para después decrecer en altitud.

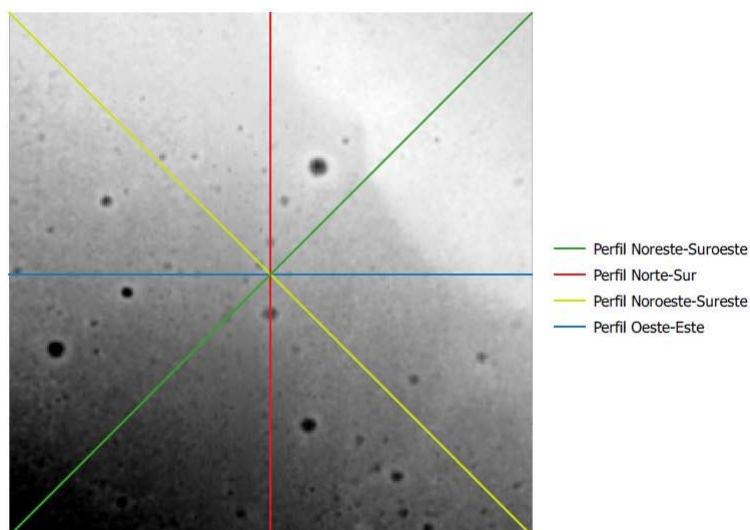
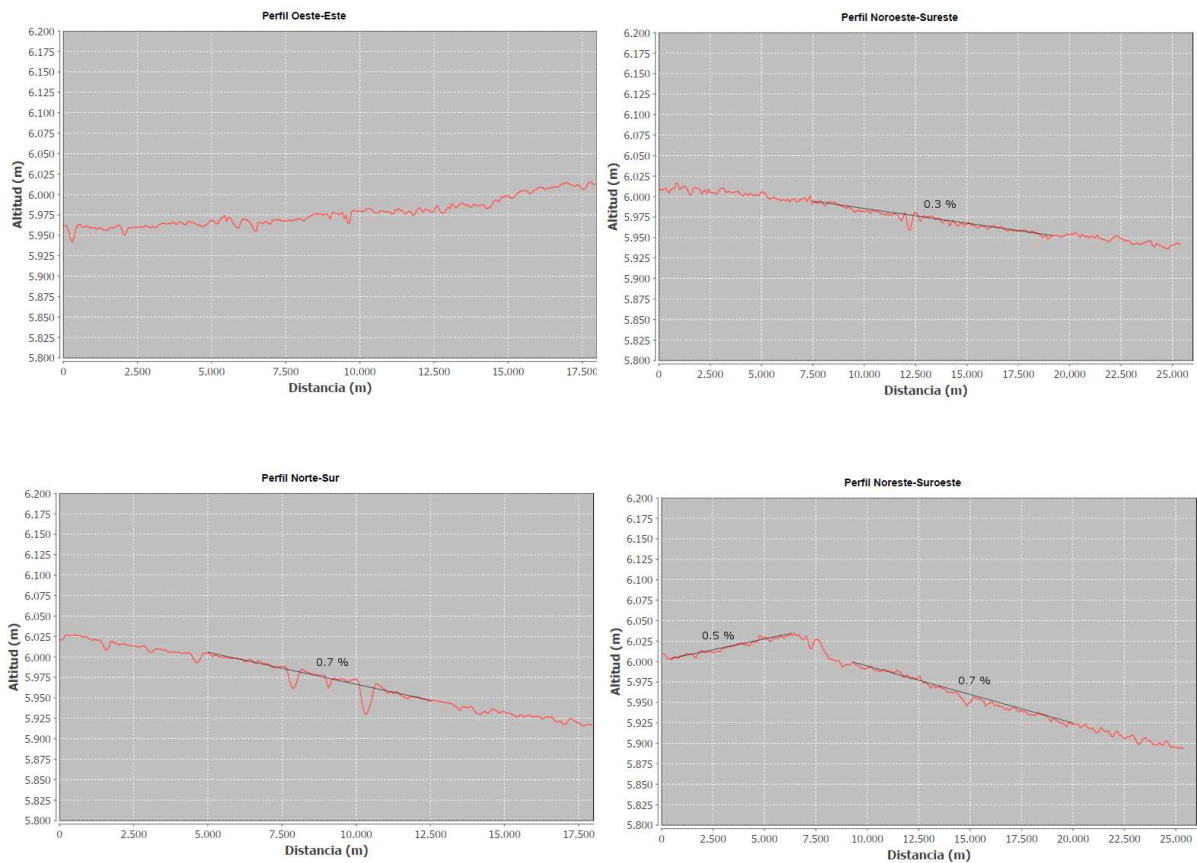


Figura 5.18. Perfiles topográficos Apolo 12



Como apoyo a este analisis se recomienda ver los mapas topograficos de la zona Apolo 12 en el “Anexo 1. Cartografía de las zonas de alunizaje”.

5.3. Zona de alunizaje Apolo 14

Área de estudio

El área de estudio abarca una región de 18 x 18 kilómetros de extensión ubicada entre los 3° 21' y los 3° 57' de latitud Sur y entre los 17° 11' y los 17° 46' de longitud Oeste, en cuyo centro se encuentra el punto de alunizaje del módulo lunar de la misión Apolo 14 (ver Figura 5.19).

La zona se encuentra en la formación Fra Mauro, debe su nombre al monje y cartógrafo italiano del siglo XV, y es un astroblema o depresión que deja el impacto de un meteorito en la superficie de un cuerpo planetario.

Se trata de una extensión montañosa que ocupa una superficie alrededor del Mare Imbrium. Pudo ser formada por las eyecciones del impacto que originó dicho mar. Esta extensión está formada por crestas y cerros relativamente bajos, entre los que existen valles ondulados. Las muestras recogidas por los astronautas de esta misión indican un impacto y una eyección, en un periodo de aproximadamente 500 millones de años.

Geológicamente, el área inmediata al alunizaje está formada por brechas regolíticas, brechas fragmentarias, litologías ígneas, litologías granulares y litologías vítreas de impacto. Y este fue el criterio de elección de esta zona, conseguir muestras de los materiales eyectados durante el impacto que originó el Mare Imbrium.

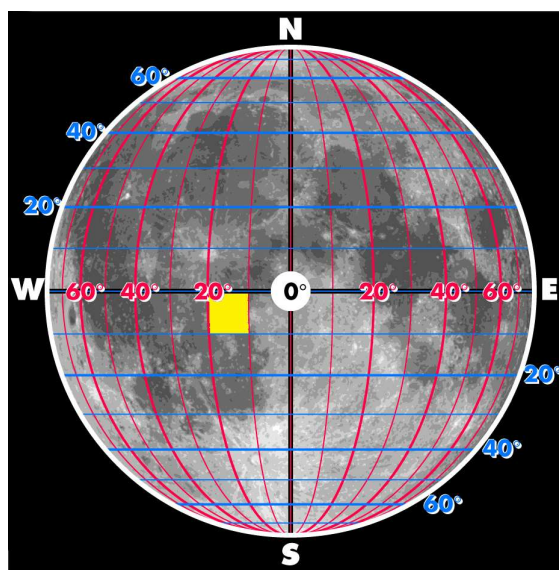


Figura 5.19. Localización área de estudio Apolo 14

Parámetros estadísticos

Las altitudes del área de estudio están comprendidas entre los 6.117 y los 6.589 metros sobre el radio medio lunar de 1.730.000 metros, por lo que todas las altitudes de esta zona están comprendidas en un rango de 472 metros. Se observa que esta zona elegida para el alunizaje del Apolo 14 es un poco más interesante en cuanto a orografía que las zonas de las misiones precedentes, Apolo 11 y Apolo 12 (ver Tabla 5.3).

Máximo [m]	Mínimo [m]	Media [m]	Mediana [m]
6589,000	6117,000	6347,922	6342,000

Rango [m]	Desviación estándar [m]	Coficiente de variación [%]
472,000	63,342	0,998

Tabla 5.3. Estadísticos descriptivos Apolo 14

Se puede apreciar en el histograma de elevaciones (ver Figura 5.20) como la mayor parte de los puntos de la zona de estudio se encuentran comprendidos entre los 6.300 y los 6.400 metros de altitud.

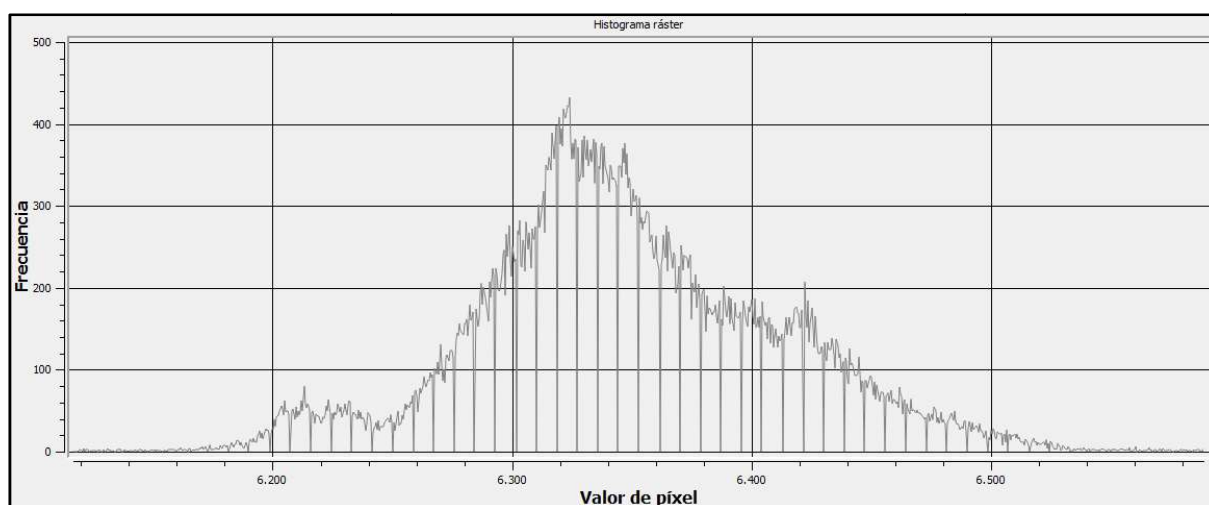


Figura 5.20. Histograma de elevaciones Apolo 14

Mapa de curvas de nivel

Con la representación del curvado con una equidistancia de 20 metros sobre el modelo digital de elevaciones del área de estudio (ver Figura 5.21), se puede observar como el terreno alcanza altitudes máximas en la zona centro-sureste, cayendo bruscamente la altitud en el margen este.

Como se ve, en esta zona el terreno no sigue una tendencia clara de aumento en altitud hacia un sentido, a diferencia de las zonas de las misiones Apolo 11 y Apolo 12.

Se llegan a alcanzar valores de aproximadamente los 6.500 metros de altitud en la zona más alta y de 6.200 metros en las zonas más bajas, llegando incluso a valores mínimos de 6.180 de profundidad en algunos cráteres como el situado al Oeste de la zona.

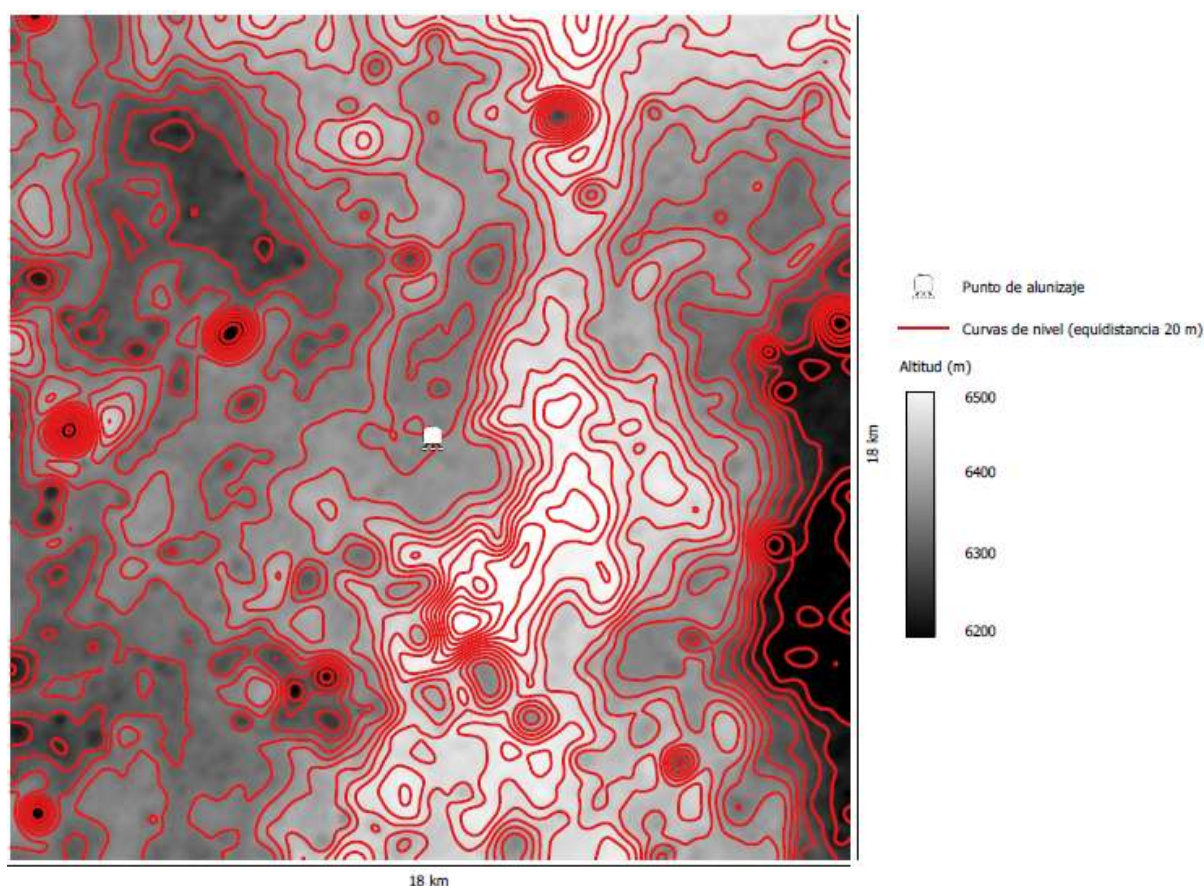


Figura 5.21. Mapa de curvas de nivel Apolo 14 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de pendientes

Con el mapa de pendientes del área de estudio se pone de manifiesto principalmente los cráteres de impacto de meteoritos sobre la superficie lunar donde se alcanzan pendientes de hasta el 30%. El resto de la zona se mantiene constante con pendientes que varían entre 1% y el 8%, lo que indica que se trata de un terreno más variable que en misiones anteriores (ver Figura 5.22).

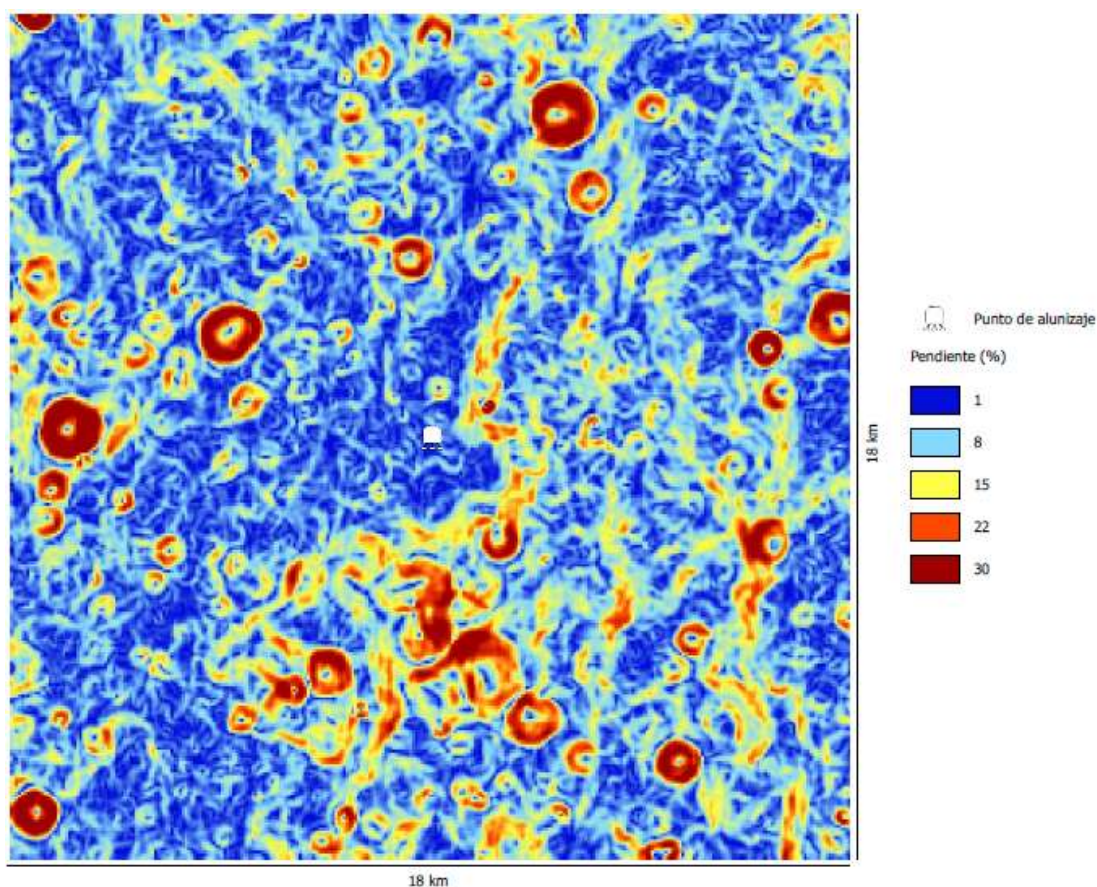


Figura 5.22. Mapa de pendientes Apolo 14 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de orientaciones

Con la representación del mapa de orientaciones se representa el azimut hacia el que mira el plano de máxima pendiente (plano tangente) en cada punto. En el caso de la zona del Apolo 14 (ver Figura 5.23) se aprecia la irregularidad del

terreno debido a la gran cantidad de cráteres de impacto de diversos tamaños, que hacen que no exista una orientación predominante en el terreno.

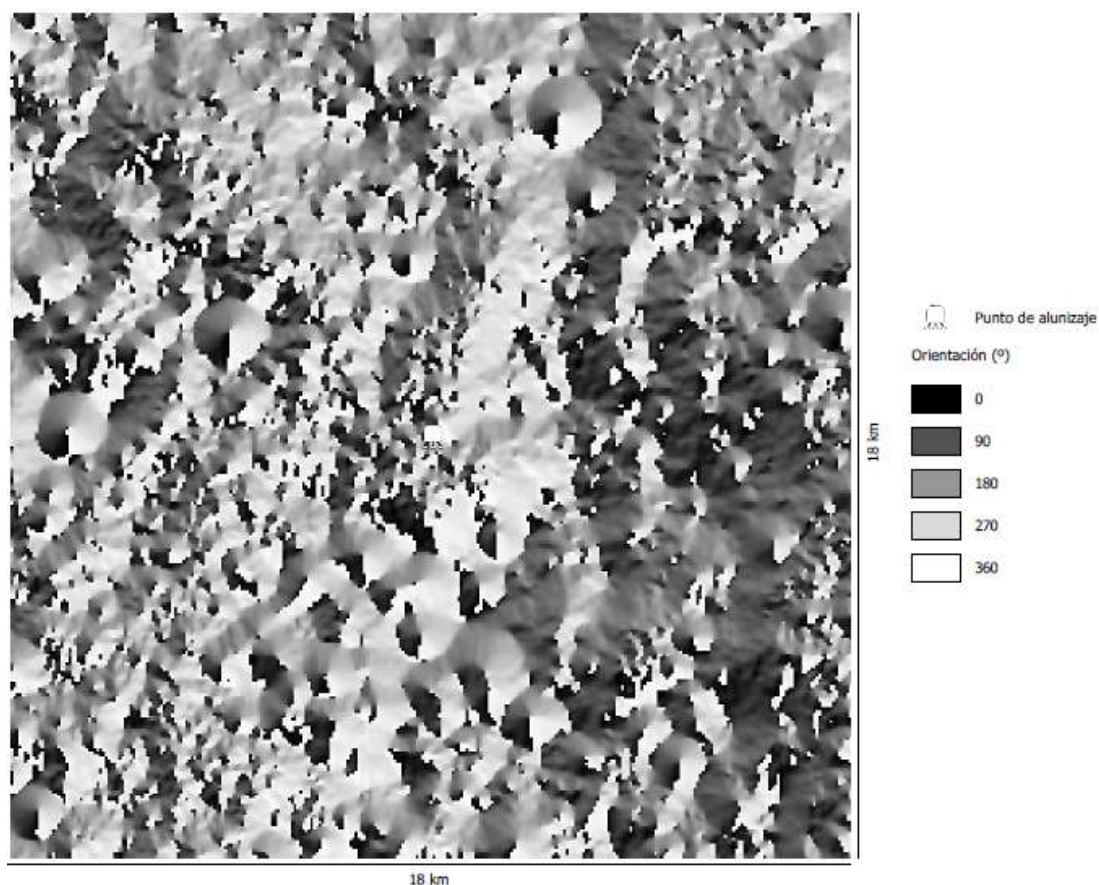


Figura 5.23. Mapa de orientaciones Apolo 14 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de sombras

En el mapa de sombras generado (ver Figura 5.24) se ha simulado un azimut de la fuente de luz (Sol) de 315° y una altitud de 45° .

Se aprecia que en la zona no hay formaciones montañosas ni grandes desniveles salvo los cráteres que se distinguen perfectamente por la sombra simulada.

La zona central, donde se produjo el alunizaje de la nave, se encuentra relativamente llana.

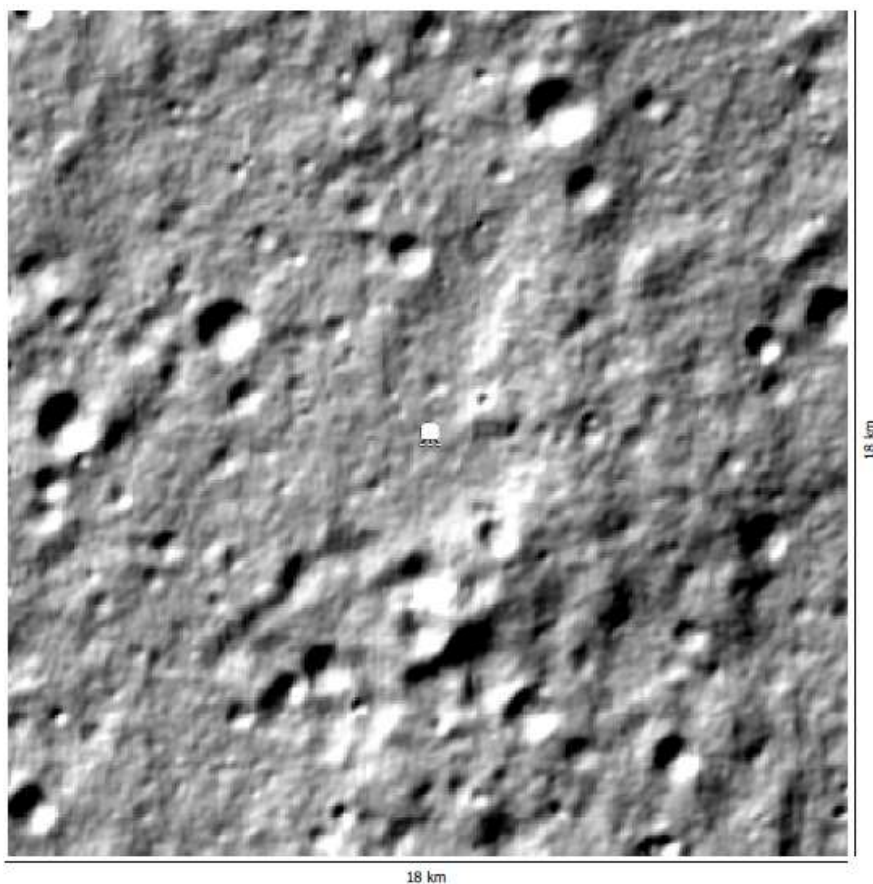


Figura 5.24. Mapa de sombras Apolo 14(escala aproximada 1:178.500)

Cuenca visual

En el cálculo de la cuenca visual (ver Figura 5.25) desde el punto de alunizaje se puede observar la extensión de terreno que sería visible desde dicho punto para una altura de un observador de 2 metros aproximadamente. Las zonas visibles están representadas por un tono más claro sobre el modelo digital de elevaciones.

Se observan pequeñas zonas alrededor de la zona de alunizaje que no serían visibles debido a que son pequeñas depresiones.

Estas zonas se corresponden aproximadamente con la imagen panorámica captada por los astronautas desde la misma zona (ver Figura 5.26).

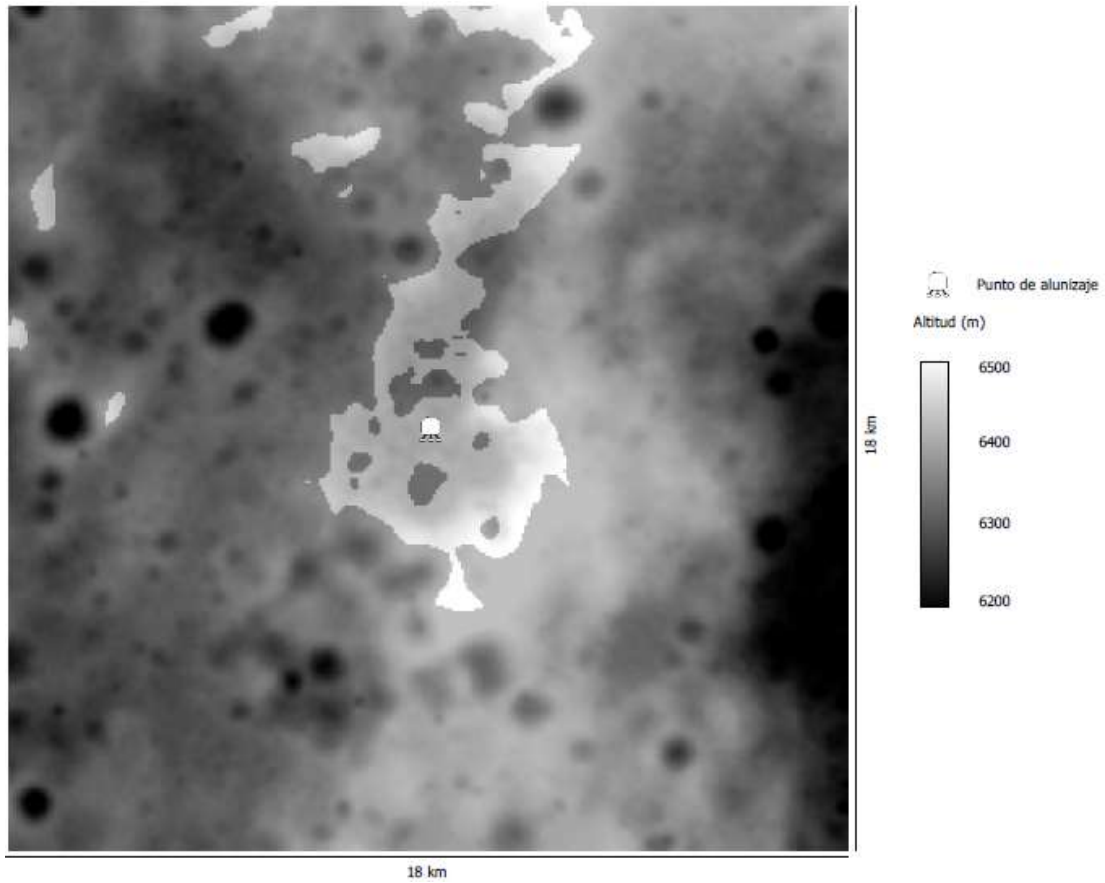


Figura 5.25. Cuenca visual Apolo 14. En tono claro las zonas visibles desde el punto de alunizaje (escala aproximada 1:178.500)



Figura 5.26. Imagen panorámica Apolo 14

Perfiles topográficos

Se han trazado cuatro perfiles en las direcciones Oeste-Este, Noroeste-Sureste, Norte-Sur y Noreste-Suroeste (ver Figura 5.27), en los que se observa perfectamente el relieve de la zona.

A diferencia de las misiones anteriores, se aprecia en los perfiles topográficos que esta zona es mucho más variable en altitud. Por ejemplo, en el perfil Oeste-Este se observa la profundidad que llega a alcanzar el cráter en el comienzo del perfil y como el terreno va ganando altitud a medida que se acerca a la zona centro-este para luego decrecer. Esta zona, la de mayor altitud en el área, se ve perfectamente como destaca del resto en el perfil Noroeste-Sureste.

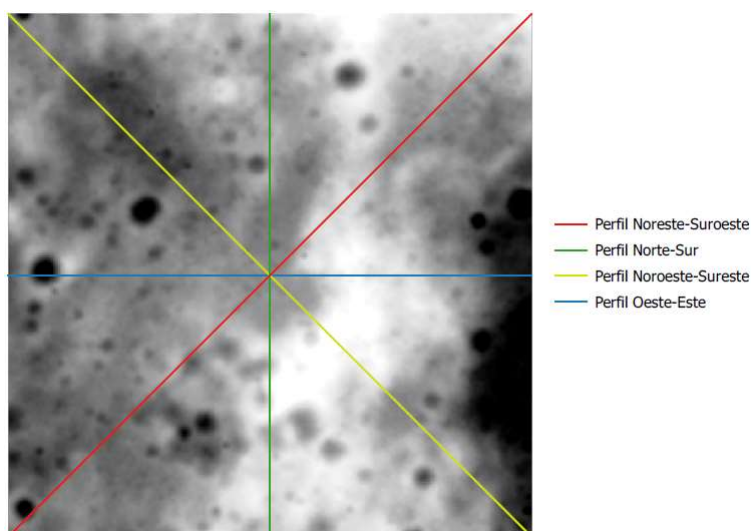
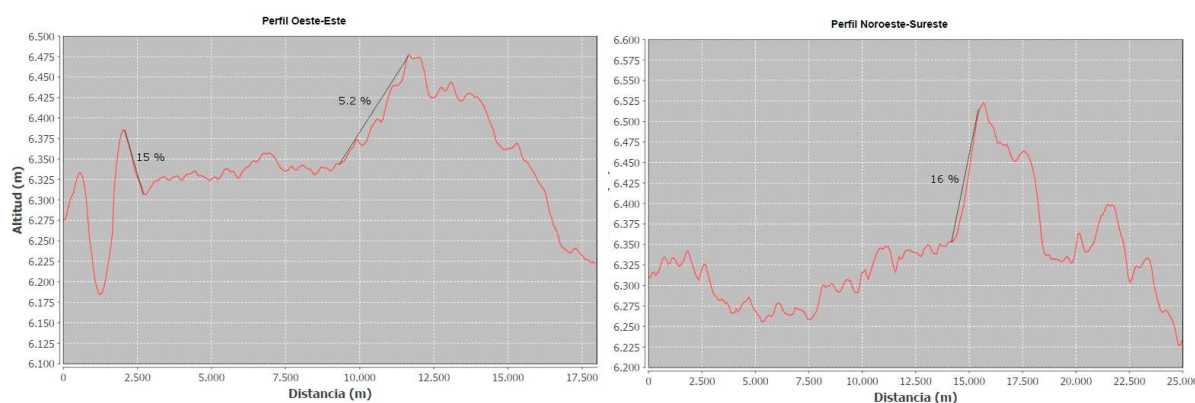
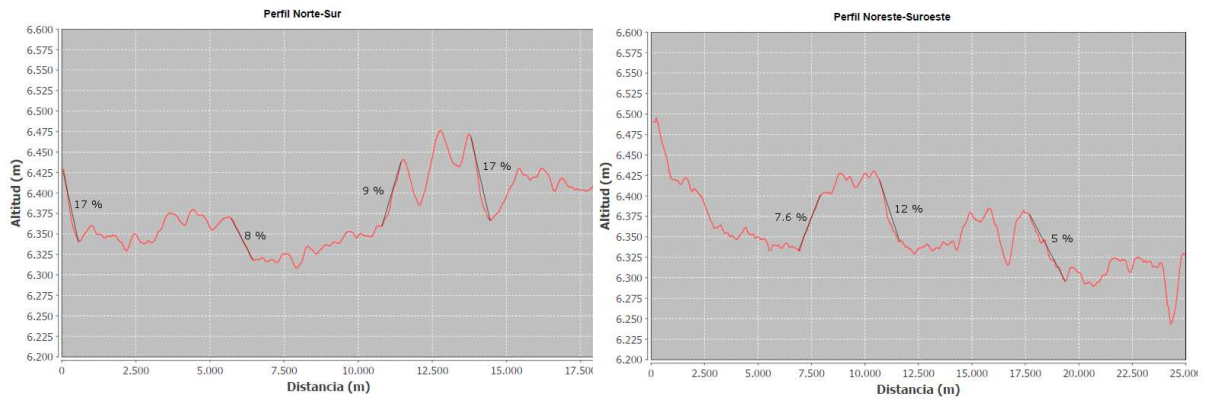


Figura 5.27. Perfiles topográficos Apolo 14





Como apoyo a este analisis se recomienda ver los mapas topograficos de la zona Apolo 14 en el “Anexo 1. Cartografía de las zonas de alunizaje”.

5.4. Zona de alunizaje Apolo 15

Área de estudio

El área de estudio abarca una región de 18 x 18 kilómetros de extensión ubicada entre los 25° 50' y los 26° 26' de latitud Norte y entre los 3° 20' y los 3° 56' de longitud Este, en cuyo centro se encuentra el punto de alunizaje del módulo lunar de la misión Apolo 12 (ver Figura 5.28).

Esta zona es conocida como Hadley Rille debido a la rima Hadley, que es una grieta sinuosa que lleva el nombre del cercano Mons Hadley. La rima está situada al borde oriental de Palus Putredinis, al pie de los Montes Apenninus, y tiene una longitud de 120 km de largo, una anchura de 2 km y una profundidad de 300 metros, presentando sus paredes una inclinación de 45 grados. Algunas hipótesis dicen que la Rima fue en el pasado un tubo subterráneo de lava cuyo techo se derrumbó tomando la apariencia actual.

Esta región fue elegida para esta misión por sus múltiples características, a las que se podía sacar partido gracias al vehículo lunar utilizado por los astronautas. El objetivo era muestrear el borde de la cuenca Imbrium, así como explorar los montes Apenninos y la Rima Hadley.

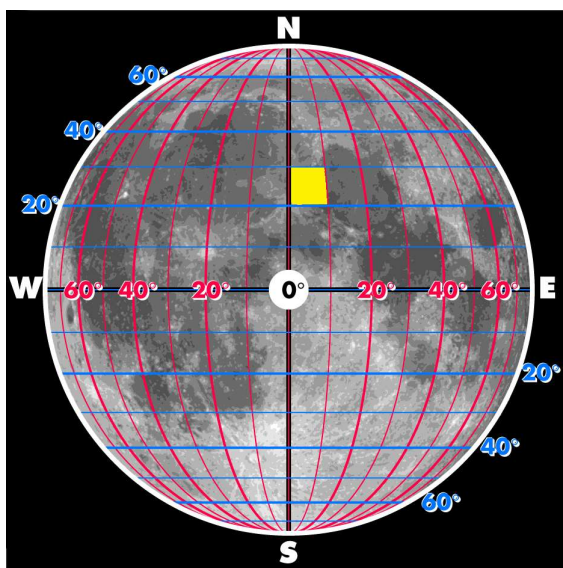


Figura 5.28. Localización área de estudio Apolo 15

Parámetros estadísticos

Las altitudes del área de estudio están comprendidas entre los 5.162,500 y los 7.418,500 metros sobre el radio medio lunar de 1.730.000 metros, por lo que todas las altitudes de esta zona están comprendidas en un rango de 2.256 metros (ver Tabla 5.4). Como se puede observar esta es la primera zona de alunizaje con un relieve característico y que pone de manifiesto que la elección de este lugar tuvo como propósito estudiar formas del terreno más interesantes geológicamente hablando que en misiones anteriores.

Máximo [m]	Mínimo [m]	Media [m]	Mediana [m]
7418,500	5162,500	5560,606	5474,500

Rango [m]	Desviación estándar [m]	Coefficiente de variación [%]
2256,000	312,881	5,627

Tabla 5.4. Estadísticos descriptivos Apolo 15

Se puede ver en el histograma de elevaciones (ver Figura 5.29) como la mayor parte de los puntos de la zona se concentran entre los 5.400 y 5.500 metros de altitud.

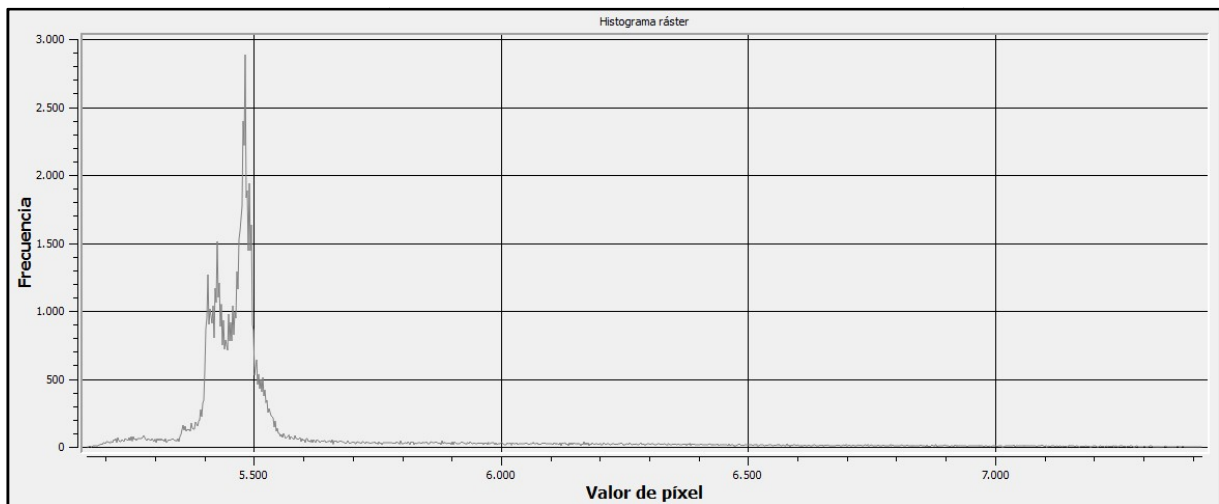


Figura 5.29. Histograma de elevaciones Apolo 15

Mapa de curvas de nivel

Con la representación del curvado con una equidistancia de 50 metros sobre el modelo digital de elevaciones del área de estudio (ver Figura 5.30), se puede observar a la perfección la rima Hadley, donde se alcanza la mínima altitud de la zona con valores que rondan los 5.200 metros, con un desnivel de 300 metros entre el fondo de la rima y el resto de la superficie, y el inicio del Mons Hadley Delta, al sur de la zona, donde se alcanzan las mayores altitudes, con valores próximos a los 7.000 metros de altitud.

También se observa en el resto de la zona, como la altitud aumenta en sentido Noroeste.

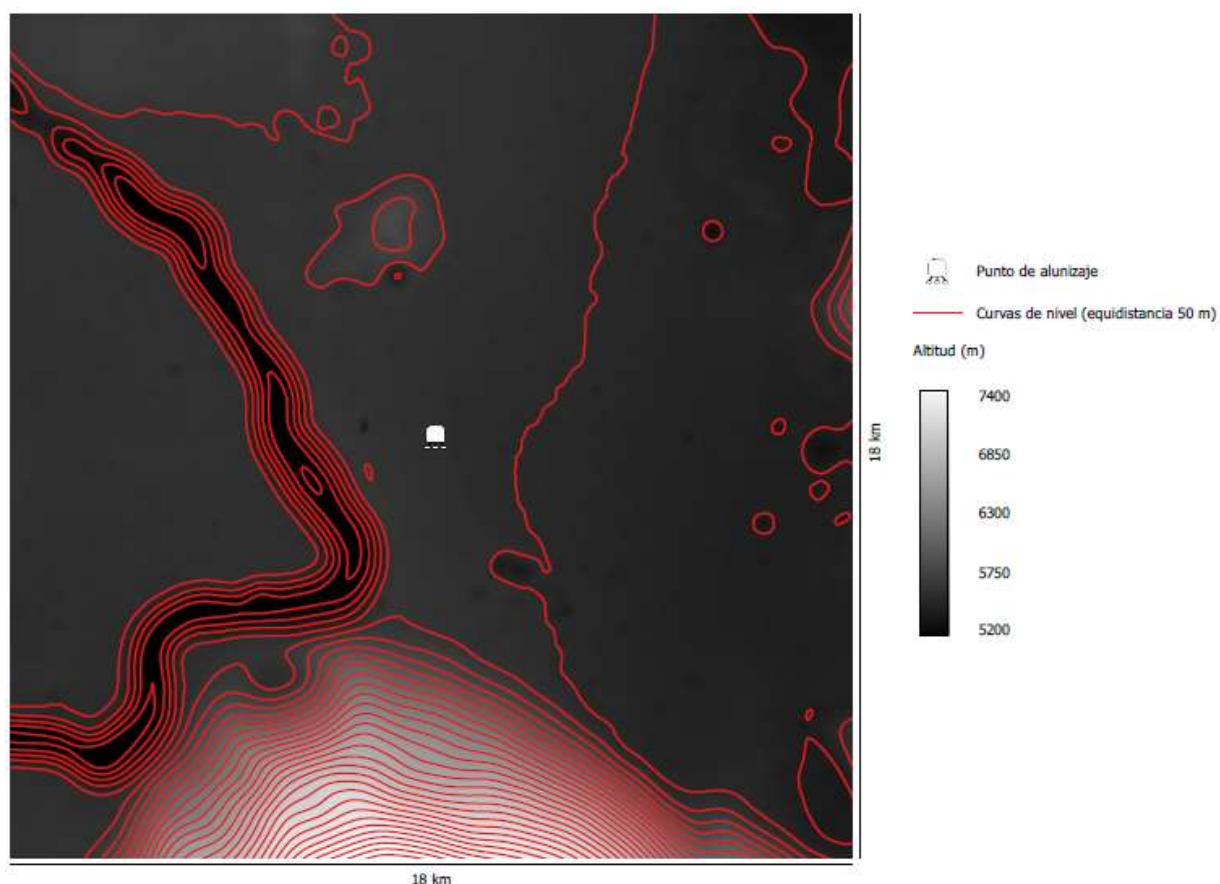


Figura 5.30. Mapa de curvas de nivel Apolo 15 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de pendientes

Con el mapa de pendientes del área de estudio se pone de manifiesto de nuevo la rima Hadley, donde la pendiente descendente alcanza valores máximos en torno al 50%, así como el inicio del Mons Hadley, donde se alcanzan pendientes que van del 27% al 50%. (ver Figura 5.31).

El resto de la zona, incluida la zona central de alunizaje, permanece con una pendiente constante inferior al 1%.

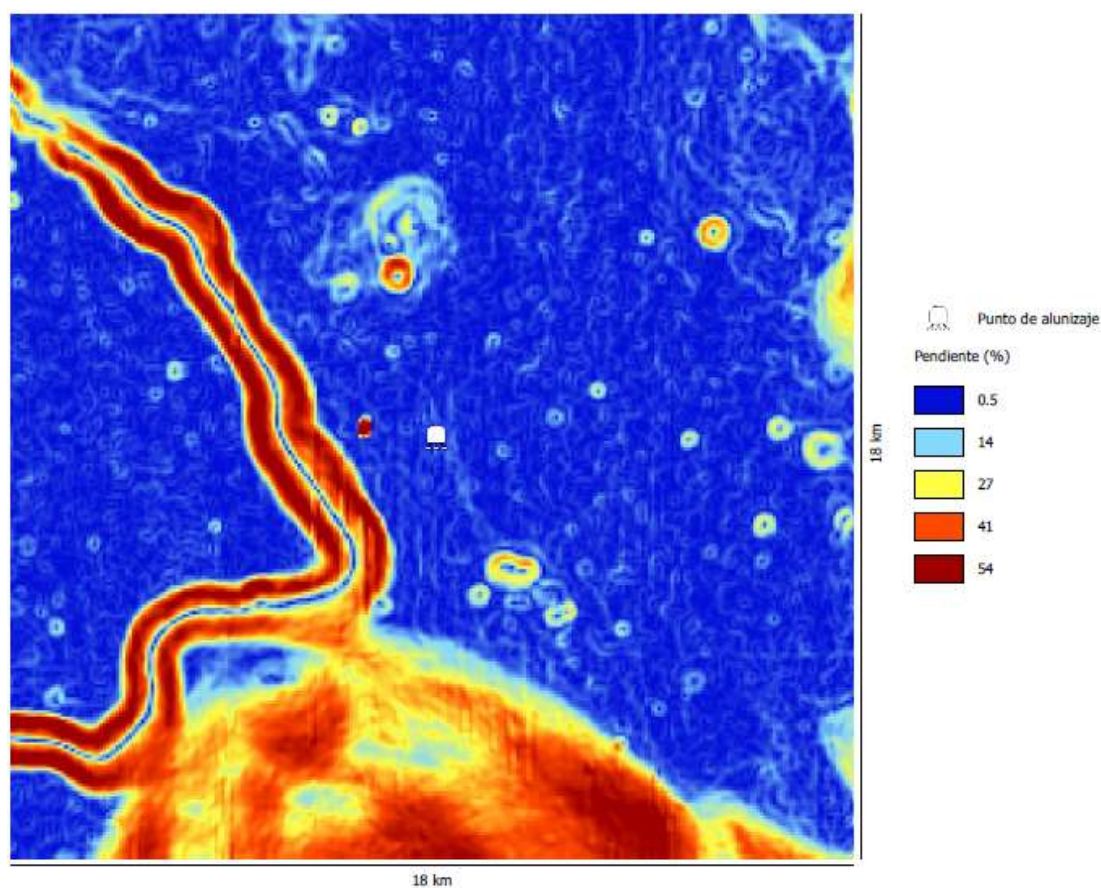


Figura 5.31. Mapa de pendientes Apolo 15 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de orientaciones

Con la representación del mapa de orientaciones se representa el azimut hacia el que mira el plano de máxima pendiente (plano tangente) en cada punto. En el caso de la zona del Apolo 15 (ver Figura 5.32) lo que más se observa son los elementos más característicos de esta zona, es decir, la rima Hadley y el Mons Hadley.

Se aprecia perfectamente el cambio en la orientación de las paredes de la rima en el fondo de la misma, así como el cambio de pendiente en el monte Hadley.

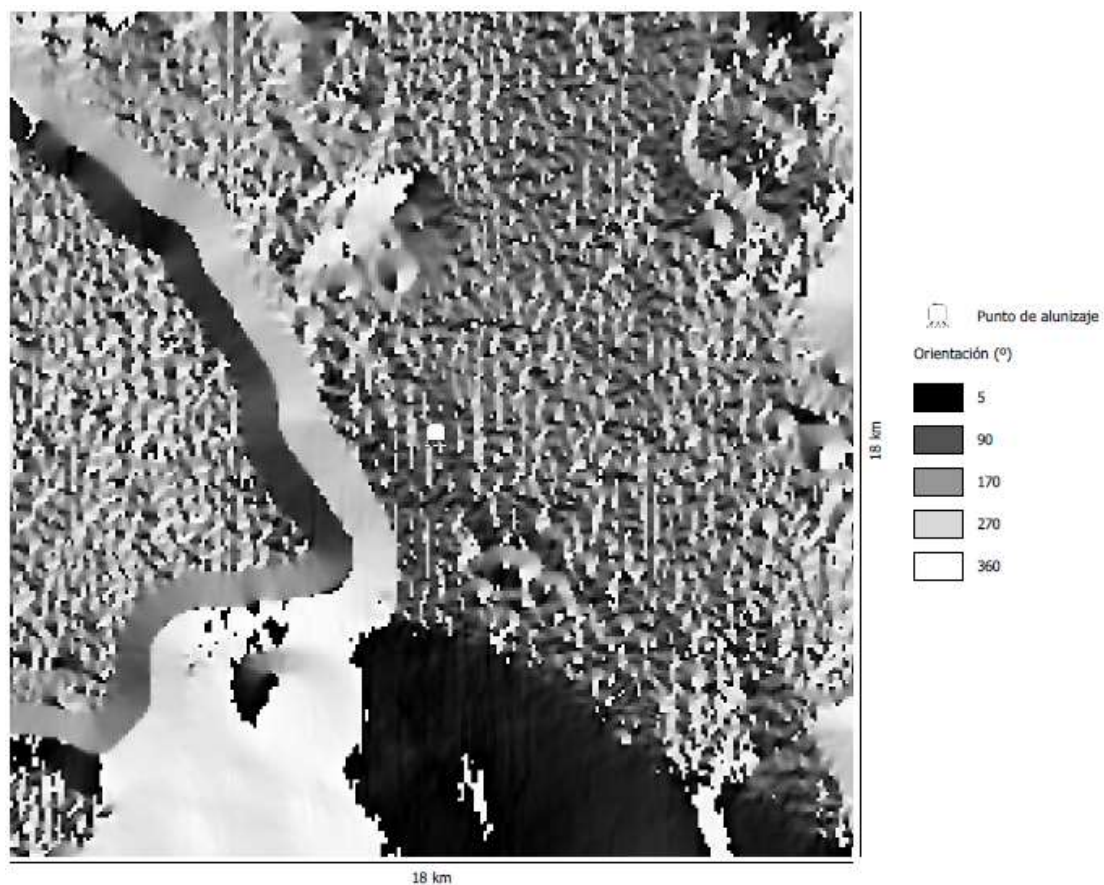


Figura 5.32. Mapa de orientaciones Apolo 15 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de sombras

En el mapa de sombras generado (ver Figura 5.33) se ha simulado un azimut de la fuente de luz (Sol) de 315° y una altitud de 45° .

De nuevo se puede observar como el ancho y la profundidad de la rima es lo que más destaca en esta zona, y también el inicio del monte Hadley. Motivos estos por los que se eligió esta zona para el alunizaje del Apolo 15, para poder explorar estas formaciones geológicas.

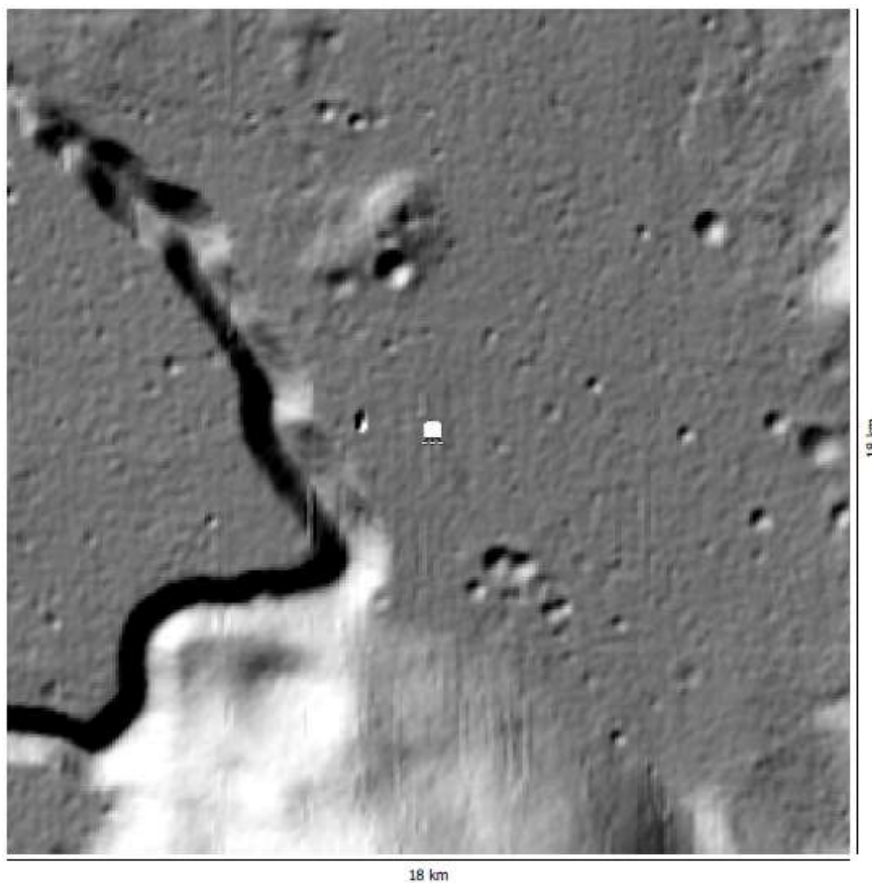


Figura 5.33. Mapa de sombras Apolo 15 (escala aproximada 1:178.500)

Cuenca visual

En el cálculo de la cuenca visual (ver Figura 5.34) desde el punto de alunizaje se puede observar la extensión de terreno que sería visible desde dicho punto para una altura de un observador de 2 metros aproximadamente. Las zonas visibles están representadas por un tono más claro sobre el modelo digital de elevaciones.

Se ve claramente como la formación montañosa Hadley sería visible desde la posición de los astronautas, y como la rima no es visible para ellos debido al aumento en altitud antes de la misma en la dirección oeste.

Estas zonas se corresponden aproximadamente con la imagen panorámica captada por los astronautas desde la misma zona (ver Figura 5.35).

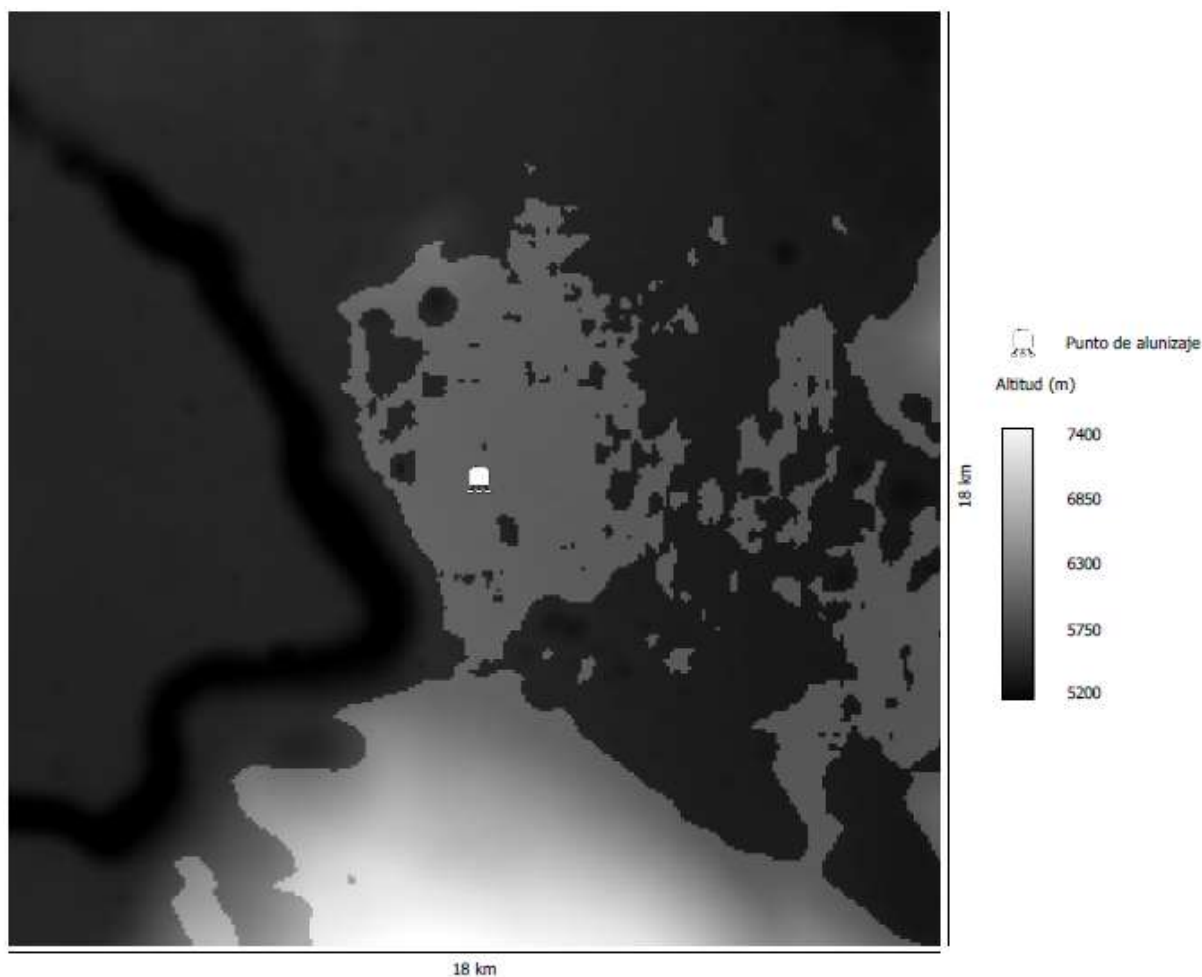


Figura 5.34. Cuenca visual Apolo 15. En tono claro las zonas visibles desde el punto de alunizaje (escala aproximada 1:178.500)



Figura 5.35. Imagen panorámica Apolo 15

Perfiles topográficos

Se han trazado cuatro perfiles en las direcciones Oeste-Este, Noroeste-Sureste, Norte-Sur y Noreste-Suroeste (ver Figura 5.36), en los que se observa perfectamente el relieve de la zona.

En el perfil Oeste-Este, el único que cruza la rima junto con el Noreste-Suroeste, se puede apreciar la profundidad de la misma perfectamente, así como la pequeña elevación en la zona más cercana al lugar de alunizaje, que impedía ver la rima a los astronautas.

Otro perfil interesante es el Norte-Sur, ya que se puede ver como toda la zona es prácticamente llana hasta llegar al final del perfil, en la parte sur, donde comienza a aumentar la altitud de manera pronunciada, pues es el inicio del Mons Hadley.

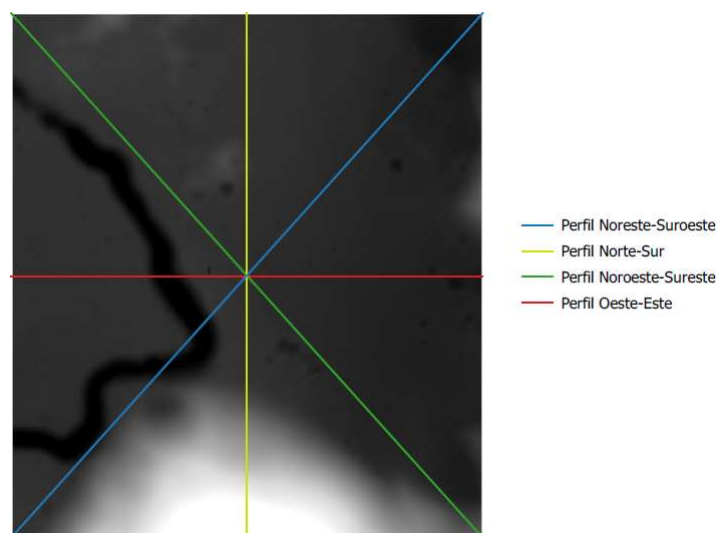
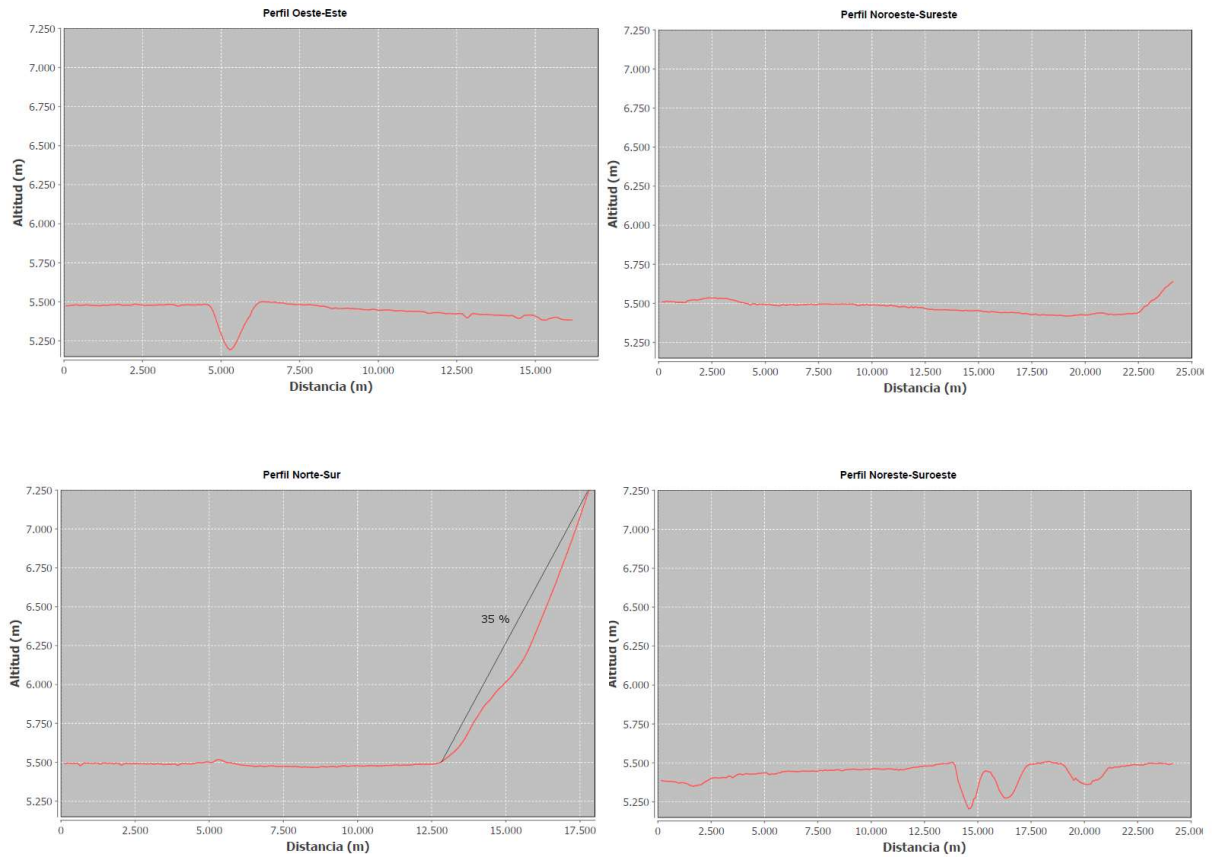


Figura 5.36. Perfiles topográficos Apolo 15



Como apoyo a este analisis se recomienda ver los mapas topograficos de la zona Apolo 15 en el “Anexo 1. Cartografía de las zonas de alunizaje”.

5.5. Zona de alunizaje Apolo 16

Área de estudio

El área de estudio abarca una región de 18 x 18 kilómetros de extensión ubicada entre los 8° 41' y los 9° 16' de latitud Sur y entre los 15° 12' y los 15° 48' de longitud Este, en cuyo centro se encuentra el punto de alunizaje del módulo lunar de la misión Apolo 16 (ver Figura 5.37).

Esta zona se encuentra en las Tierras Altas de Descartes, un área del altiplano lunar que se encuentra alrededor del cráter Descartes, por las que reciben su nombre. Dos formaciones principales destacan: la llanura de Cayley y la formación Descartes. Esta última donde se produjo el alunizaje.

Esta formación se caracteriza por un paisaje ondulado cubierto de numerosos bordes de cráteres. En un principio se pensaba que el material volcánico sería abundante en esta zona pero después de analizar las muestras recogidas por los astronautas del Apolo 16 se comprobó que muchas de las rocas de la zona no eran de origen volcánico, sino brechas compuestas de fragmentos de varios impactos lunares. El muestreo de materiales en estas zonas altas fue uno de los principales criterios establecidos en la elección de esta zona para la misión Apolo 16.

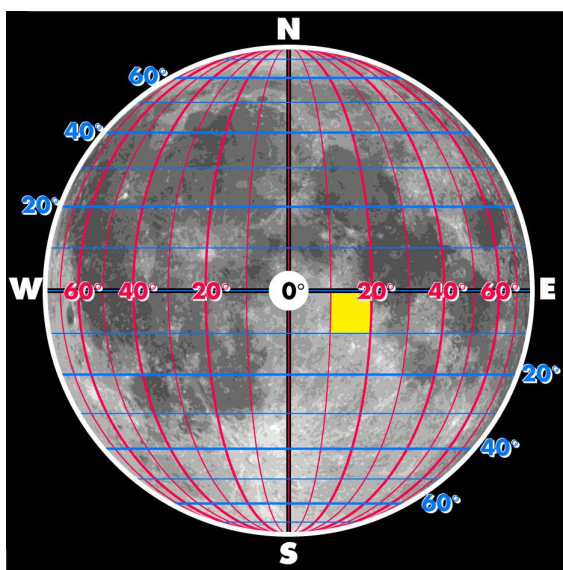


Figura 5.37. Localización área de estudio Apolo 16

Parámetros estadísticos

Las altitudes del área de estudio están comprendidas entre los 7.208 y los 7.992 metros sobre el radio medio lunar de 1.730.000 metros, por lo que todas las altitudes de esta zona están comprendidas en un rango de 784 metros (ver Tabla 5.5). Como se puede observar esta es la zona de mayor altitud de todos los alunizajes realizados hasta esta misión, en la que además el relieve es cambiante a la vista de la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Máximo [m]	Mínimo [m]	Media [m]	Mediana [m]
7992,000	7208,000	7531,919	7453,500

Rango [m]	Desviación estándar [m]	Coeficiente de variación [%]
784,000	165,789	2,201

Tabla 5.5. Estadísticos descriptivos Apolo 16

En el histograma de elevaciones (ver Figura 5.38) se observa como la mayoría de los puntos de área de estudio se encuentran comprendidos entre los 7.400 y los 4.600 metros de altitud.

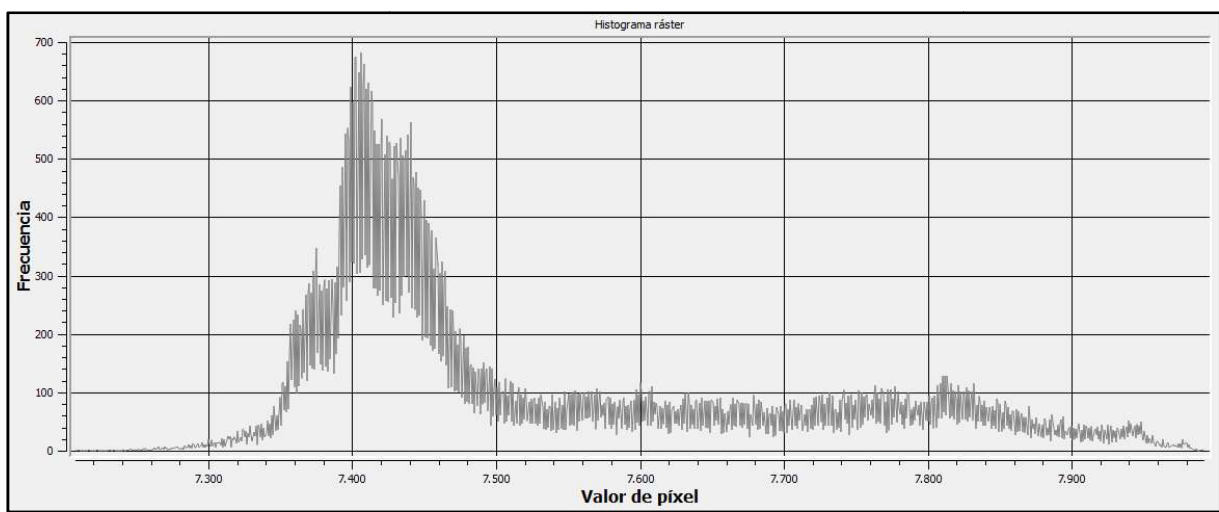


Figura 5.38. Histograma de elevaciones Apolo 16

Mapa de curvas de nivel

Con la representación del curvado con una equidistancia de 20 metros sobre el modelo digital de elevaciones del área de estudio (ver Figura 5.39), se puede observar como el terreno alcanza altitudes máximas en la zona de las montañas Stone, al Sureste, y en la montaña Smoky, al Norte, donde la altitud alcanza valores cercanos a los 8.000 metros. El resto de la zona es relativamente llano, con valores entorno a los 7.500 metros de altitud, a excepción de los cráteres de impacto donde se alcanzan los valores mínimos de altitud, en torno a los 7.350 metros.

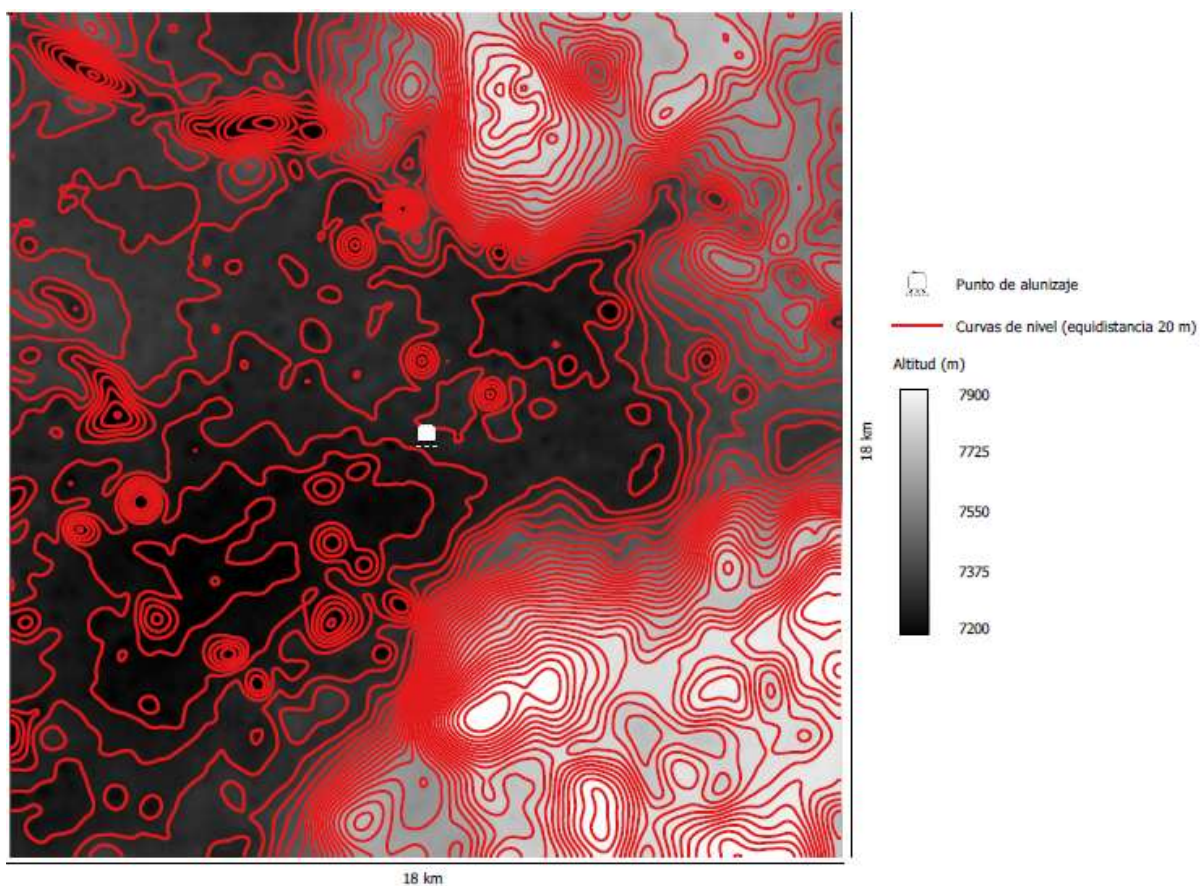


Figura 5.39. Mapa de curvas de nivel Apolo 16 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de pendientes

Con el mapa de pendientes del área de estudio se aprecia como la pendiente alcanza valores máximos en los cráteres de mayor tamaño y en el inicio de las montañas Smoky y Stone (ver Figura 5.40).

En la zona central de alunizaje se mantiene una pendiente en torno al 1% o menor. Criterio este que se cumple en todas las misiones Apolo, con el objetivo de evitar complicaciones al ahora de alunizar.

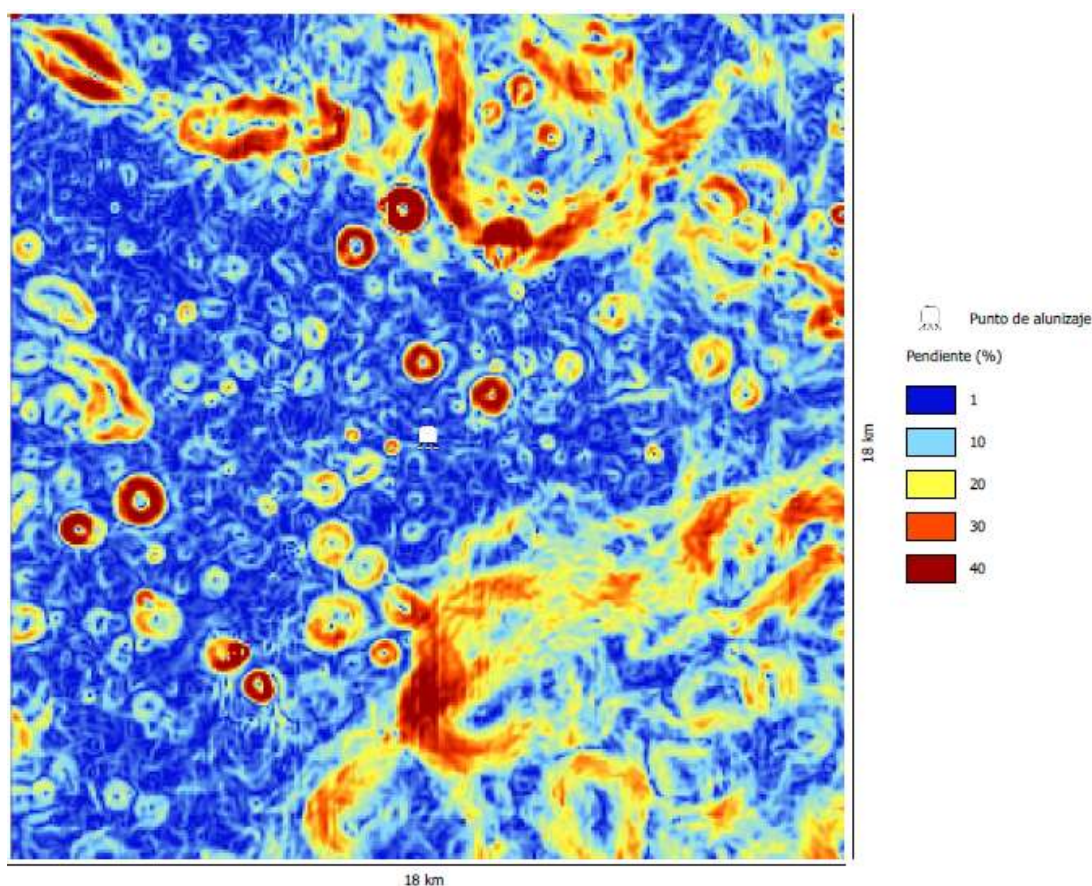


Figura 5.40. Mapa de pendientes Apolo 16 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de orientaciones

En el caso de la zona del Apolo 16 (ver Figura 5.41), se observa como existen orientaciones predominantes en las zonas montañosas según el sentido de las laderas.

En el resto de la zona no existe una orientación predominante debido a la irregularidad del terreno, compuesto por numerosos cráteres de impacto de diversos tamaños.

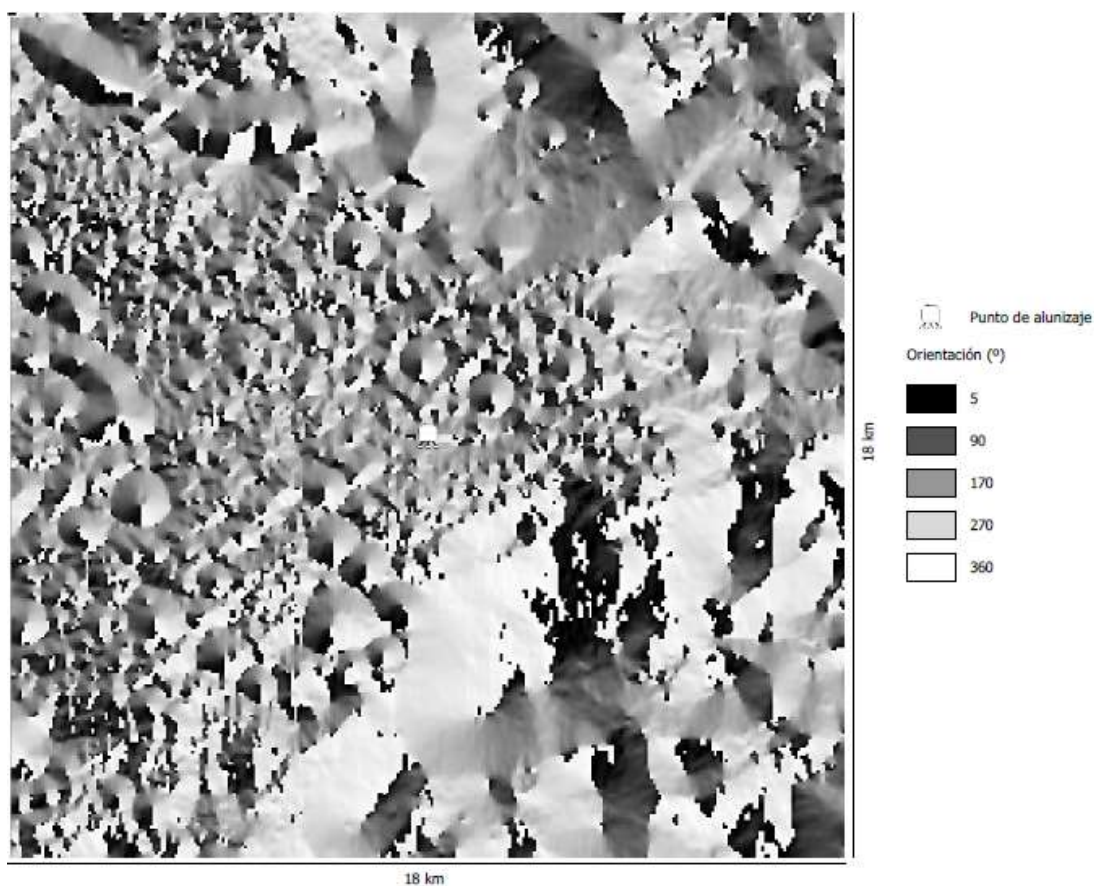


Figura 5.41. Mapa de orientaciones Apolo 16 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de sombras

En el mapa de sombras generado (ver Figura 5.42) se ha simulado un azimut de la fuente de luz (Sol) de 315° y una altitud de 45° .

Se aprecia la sombra generada por los cráteres de mayor tamaño, así como la provocada por las elevaciones de la montaña Smoky, al norte, y como incide la luz en la ladera de la montaña Stone, al sur.

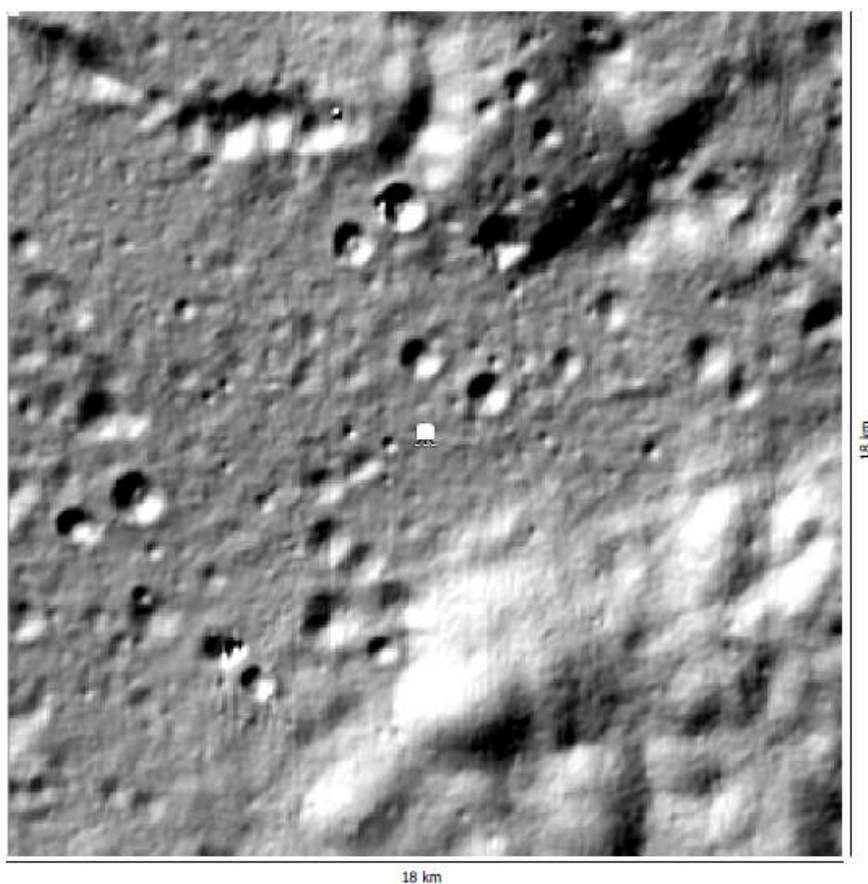


Figura 5.42. Mapa de sombras Apolo 16 (escala aproximada 1:178.500)

Cuenca visual

En el cálculo de la cuenca visual (ver Figura 5.43), nuevamente, se puede observar la extensión de terreno que sería visible desde el punto de alunizaje para

una altura de un observador de 2 metros aproximadamente. Las zonas visibles están representadas por un tono más claro sobre el modelo digital de elevaciones.

Desde el punto central de alunizaje, y en un radio de 1 km aproximadamente, es visible todo el terreno llano. Pero a partir de ahí, empiezan a aparecer zonas no visibles principalmente debido a los cráteres o zonas de menor altitud, para luego verse el inicio de las montañas al norte y al sur. Estas zonas se corresponden aproximadamente con la imagen panorámica captada por los astronautas desde la misma zona (ver Figura 5.44).

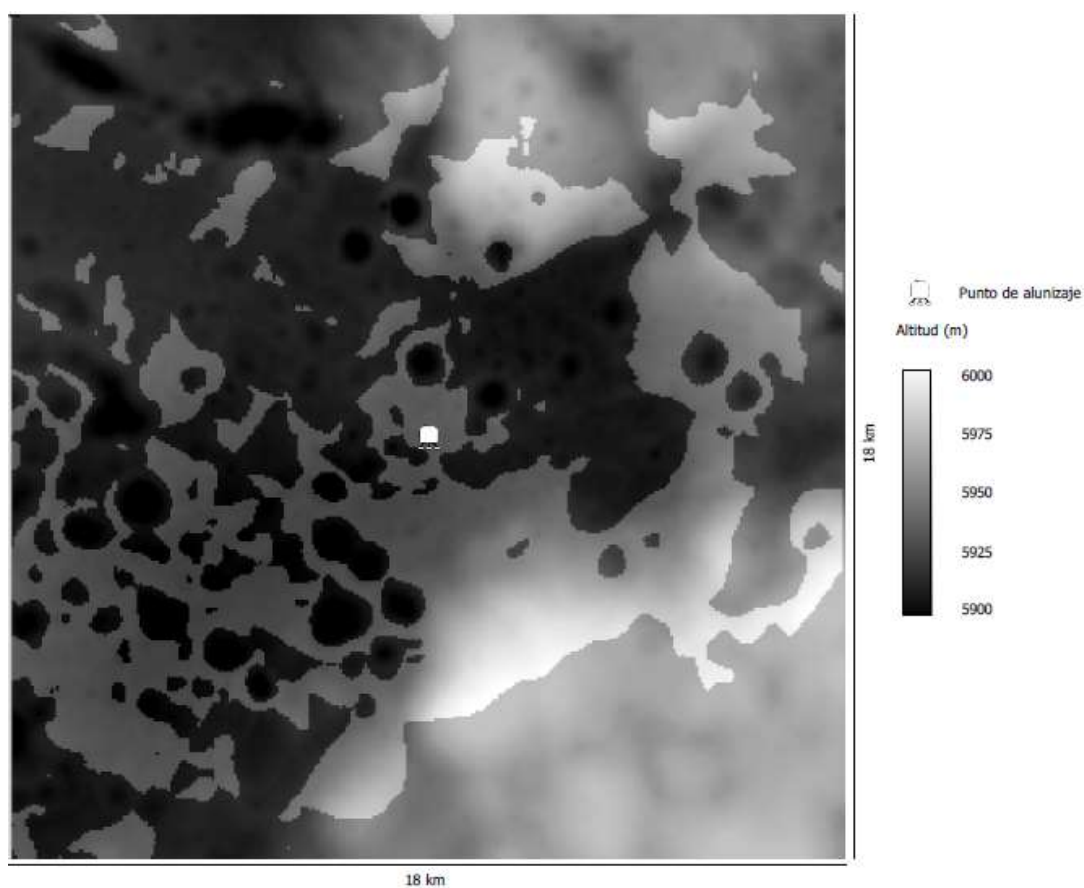


Figura 5.43. Cuenca visual Apolo 16. En tono claro las zonas visibles desde el punto de alunizaje (escala aproximada 1:178.500)



Figura 5.44. Imagen panorámica Apolo 16

Perfiles topográficos

Se han trazado cuatro perfiles en las direcciones Oeste-Este, Noroeste-Sureste, Norte-Sur y Noreste-Suroeste (ver Figura 5.45), en los que se observa perfectamente el relieve de la zona.

Los perfiles más interesantes son el Noroeste-Sureste, en el que se observa la diferencia de altitud entre la meseta central y la montaña Stone, y el Norte-Sur, en el que se observa como decrece en altitud la montaña Smoky (norte), como corta al cráter Palmetto, en la zona central, para luego incrementar en altitud en la montaña Stone (sur).

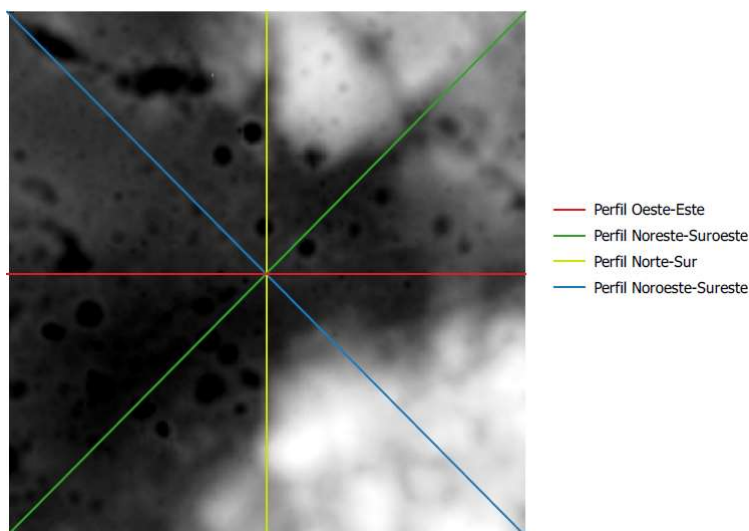
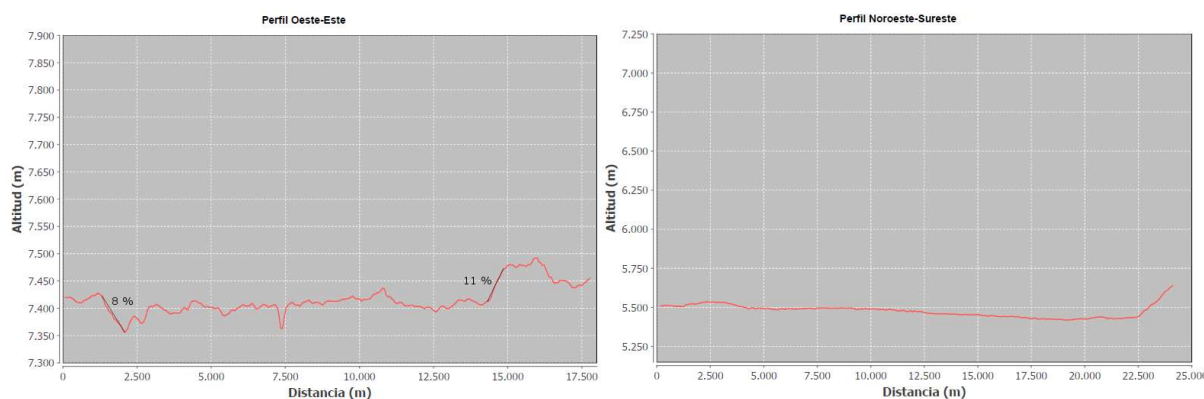
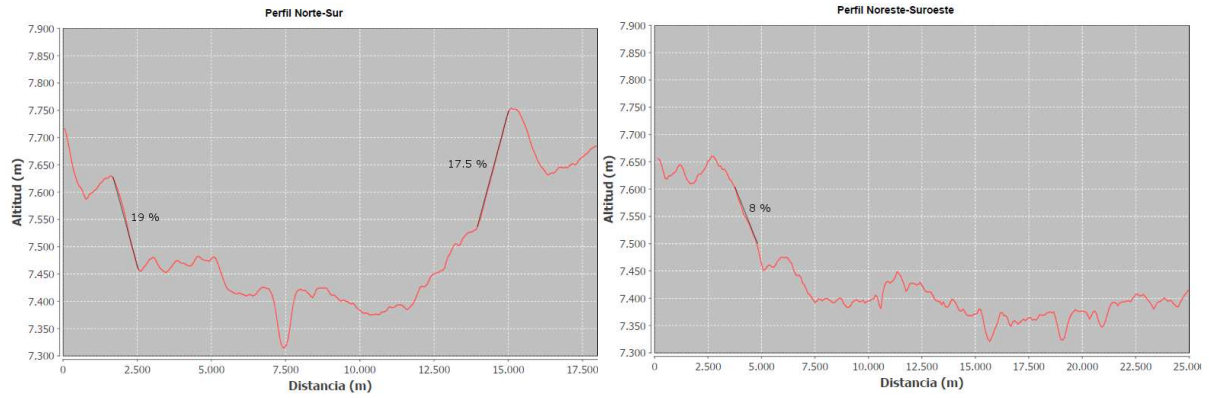


Figura 5.45. Perfiles topográficos Apolo 16





Como apoyo a este analisis se recomienda ver los mapas topograficos de la zona Apolo 16 en el “Anexo 1. Cartografía de las zonas de alunizaje”.

5.6. Zona de alunizaje Apolo 17

Área de estudio

El área de estudio abarca una región de 18 x 18 kilómetros de extensión ubicada entre los 19° 54' y los 20° 29' de latitud Norte y entre los 30° 29' y los 31° 4' de longitud Este, en cuyo centro se encuentra el punto de alunizaje del módulo lunar de la misión Apolo 17 (ver Figura 5.46).

La zona de alunizaje se encuentra en el valle Taurus-Littrow, situado en el borde sudeste del Mare Serenatis, en una cordillera de montañas formada por el impacto de un gran objeto celeste hace 3.900 millones de años.

Se trata de un valle alargado cuyo eje apunta hacia el centro del Mare Serenatis, con dos grandes macizos montañosos a ambos lados, el macizo norte y el macizo sur. La altura de estos macizos da al valle una gran profundidad. El fondo del valle es suavemente ondulado con cantos rodados de diferentes tamaños y algunos cráteres de impacto.

Los datos recogidos por los astronautas de la misión mostraron que el valle está compuesto principalmente por brechas ricas en feldespato en los grandes macizos y de basalto en el subsuelo del valle cubierto por una capa de regolito lunar de materiales mixtos.

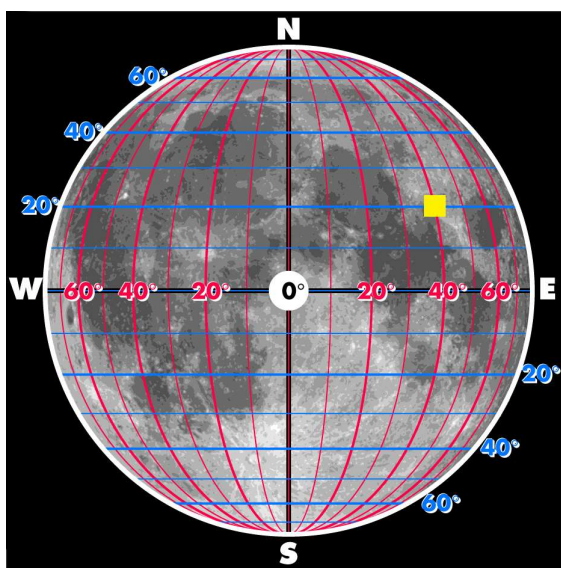


Figura 5.46. Localización área de estudio Apolo 17

Parámetros estadísticos

Las altitudes del área de estudio están comprendidas entre los 4.466,500 y los 7.127,500 metros sobre el radio medio lunar de 1.730.000 metros, por lo que todas las altitudes de esta zona están comprendidas en un rango de 2.661,000 metros (ver Tabla 5.5). Como se puede observar esta es la zona de mayor variabilidad de altitud a la vista del valor de la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Máximo [m]	Mínimo [m]	Media [m]	Mediana [m]
7127,500	4466,500	5207,995	4955,500

Rango [m]	Desviación estándar [m]	Coeficiente de variación [%]
2661,000	586,292	11,258

Tabla 5.6. Estadísticos descriptivos Apolo 17

Se puede observar en el histograma de elevaciones (ver Figura 5.47) como la mayor parte de los puntos de la zona están entre los 4.500 y los 5.000 metros de altitud.

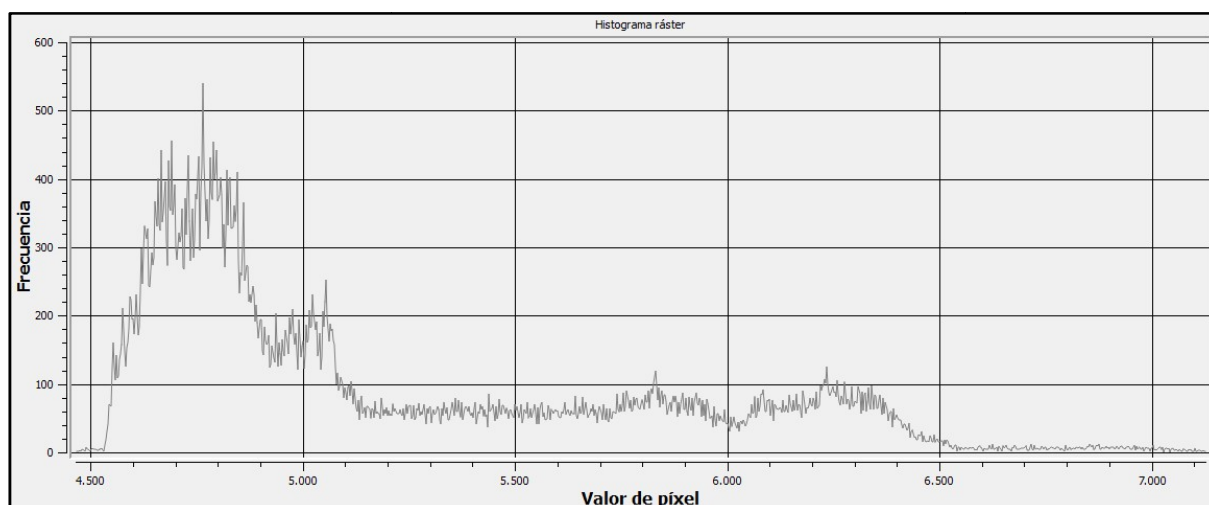


Figura 5.47. Histograma de elevaciones Apolo 17

Mapa de curvas de nivel

Con la representación del curvado con una equidistancia de 50 metros sobre el modelo digital de elevaciones del área de estudio (ver Figura 5.48), se puede observar como el terreno alcanza altitudes máximas los macizos norte y South sur, donde se alcanzan los 6.500 metros de altitud, así como el monte Bear al Sur, cuya altitud máxima es de 5.038 metros.

También se puede ver como el valle aumenta en altitud de forma gradual en sentido Noroeste, es decir, en dirección al Mare Serenatis.

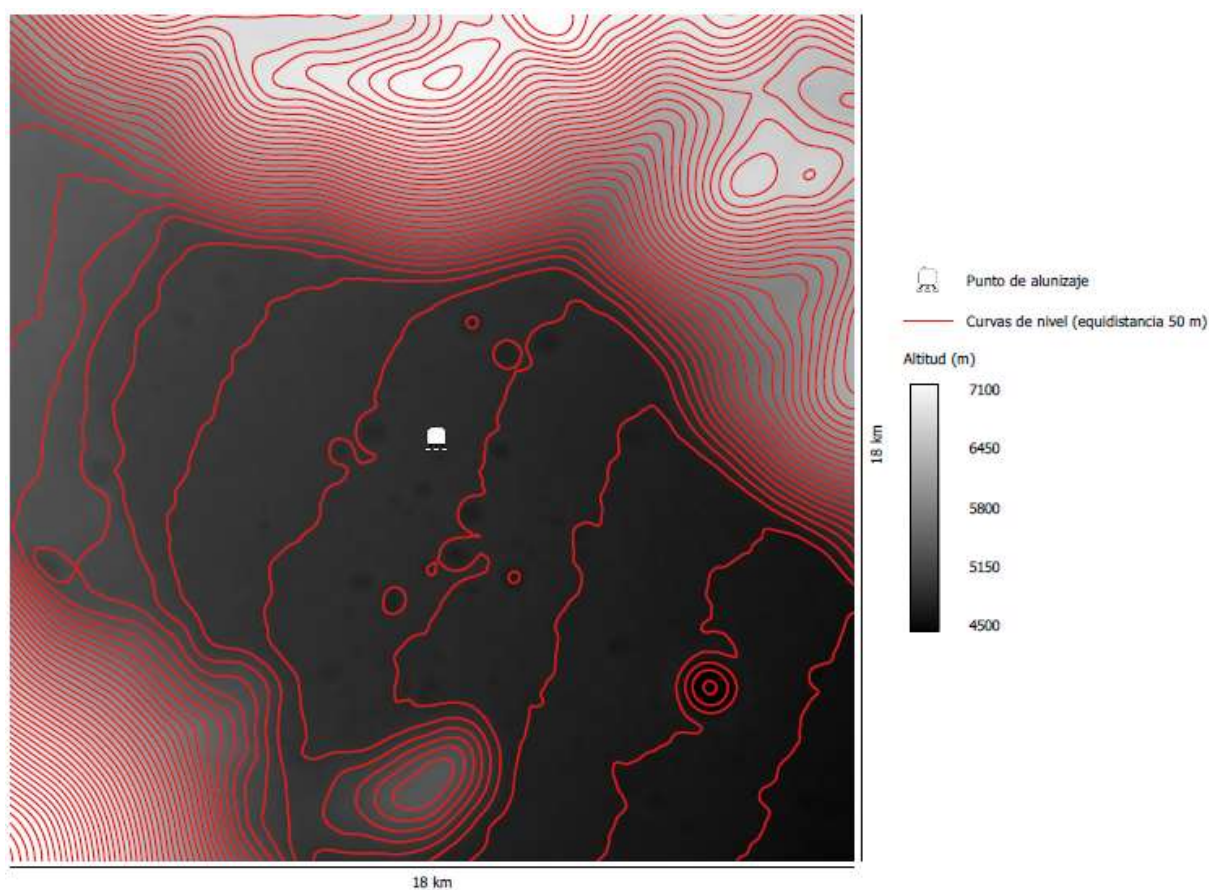


Figura 5.48. Mapa de curvas de nivel Apolo 17 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de pendientes

Con el mapa de pendientes del área de estudio se vuelve a apreciar como la pendiente alcanza valores máximos en las formaciones montañosas mencionadas anteriormente y en el cráter situado en la zona centro-sureste, donde la pendiente alcanza valores del 53% (ver Figura 5.49).

El fondo del valle permanece con pendientes constantes en torno al 1%, llegando a alcanzar el 30% en zonas concretas que se corresponden con cráteres de impacto.

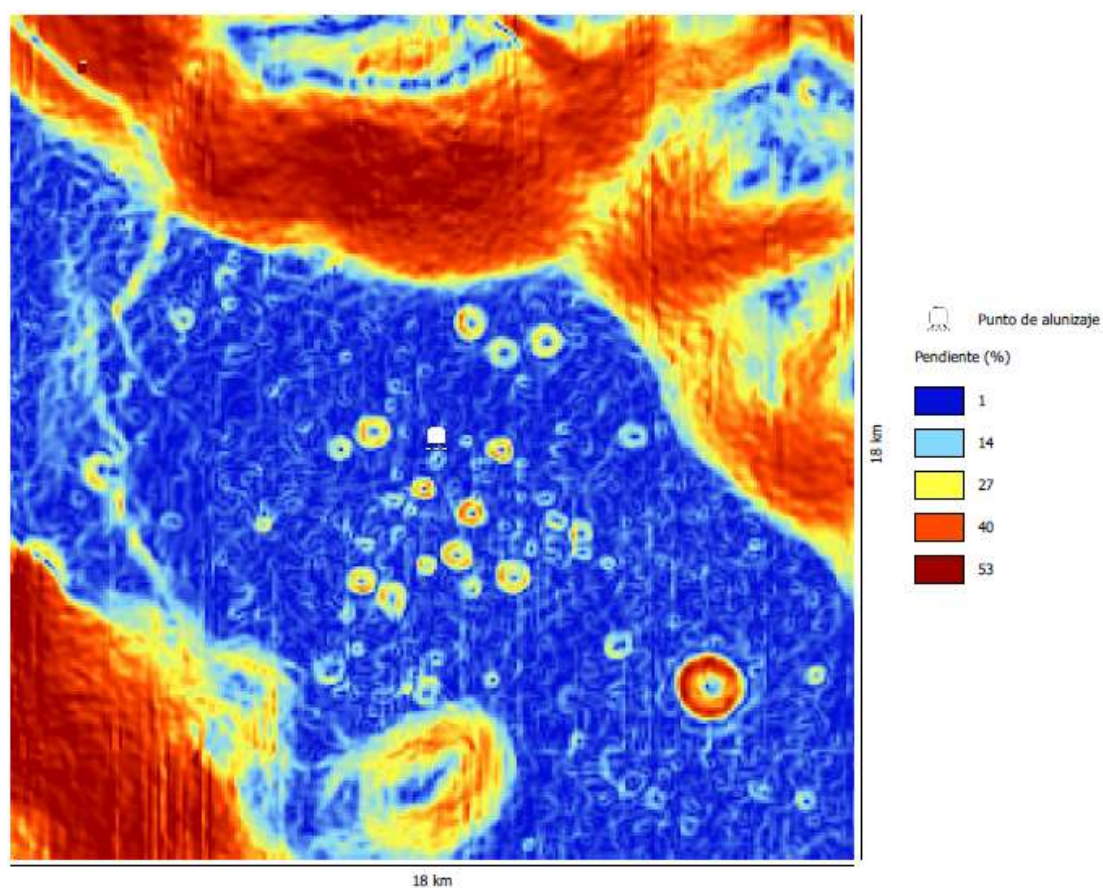


Figura 5.49. Mapa de pendientes Apollo 17 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de orientaciones

Con la representación del mapa de orientaciones se representa el azimut hacia el que mira el plano de máxima pendiente (plano tangente) en cada punto. En el caso de la zona del Apolo 17 (ver Figura 5.50) se observa perfectamente las orientaciones predominantes en los dos grandes macizos Norte y Sur, y también en la montaña Bear, al sur.

En el fondo del valle no se aprecia una orientación predominante debido a la irregularidad del terreno a causa de los cráteres.

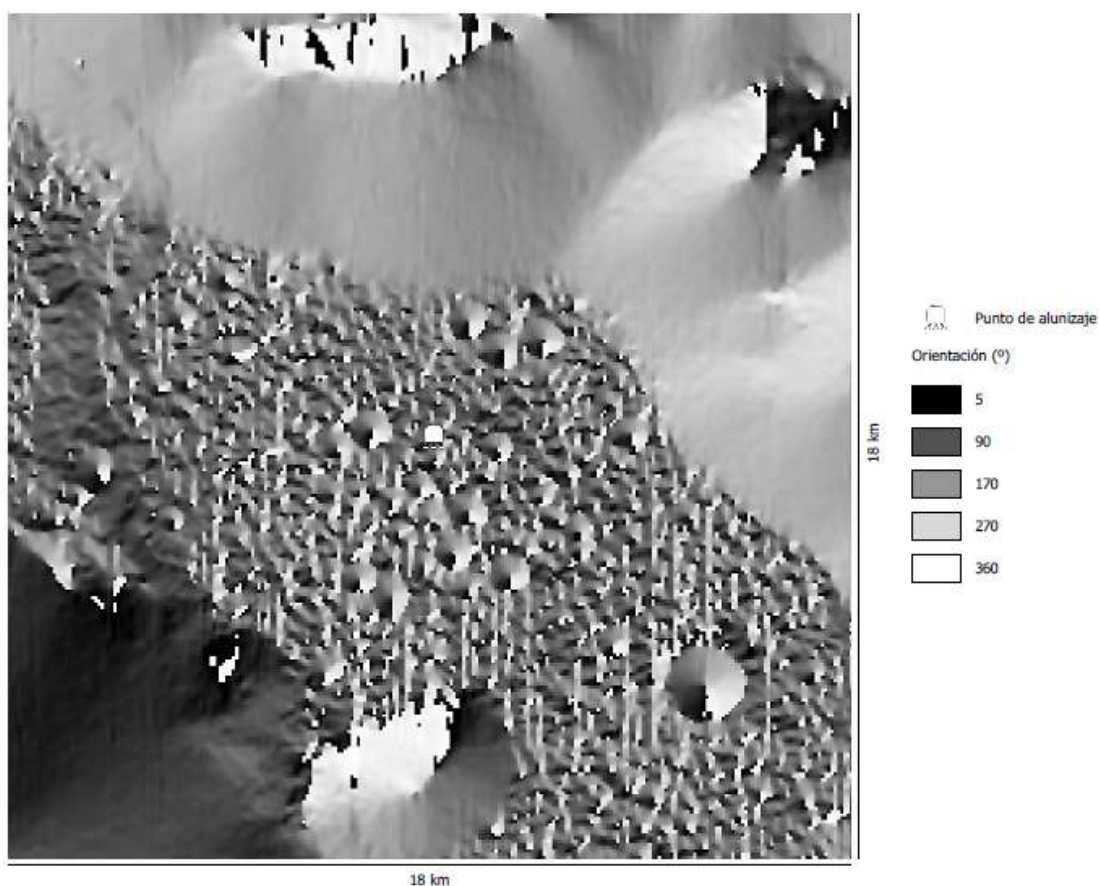


Figura 5.50. Mapa de orientaciones Apolo 17 (escala aproximada 1:178.500)

Mapa de sombras

En el mapa de sombras generado (ver Figura 5.51) se ha simulado un azimut de la fuente de luz (Sol) de 315° y una altitud de 45° .

Se aprecia perfectamente las sombras generadas por los dos grandes macizos Norte y Sur, y en menor medida la generada por el monte Bear.

También se aprecian perfectamente los cráteres de impacto en la zona central del valle Taurus-Littrow.

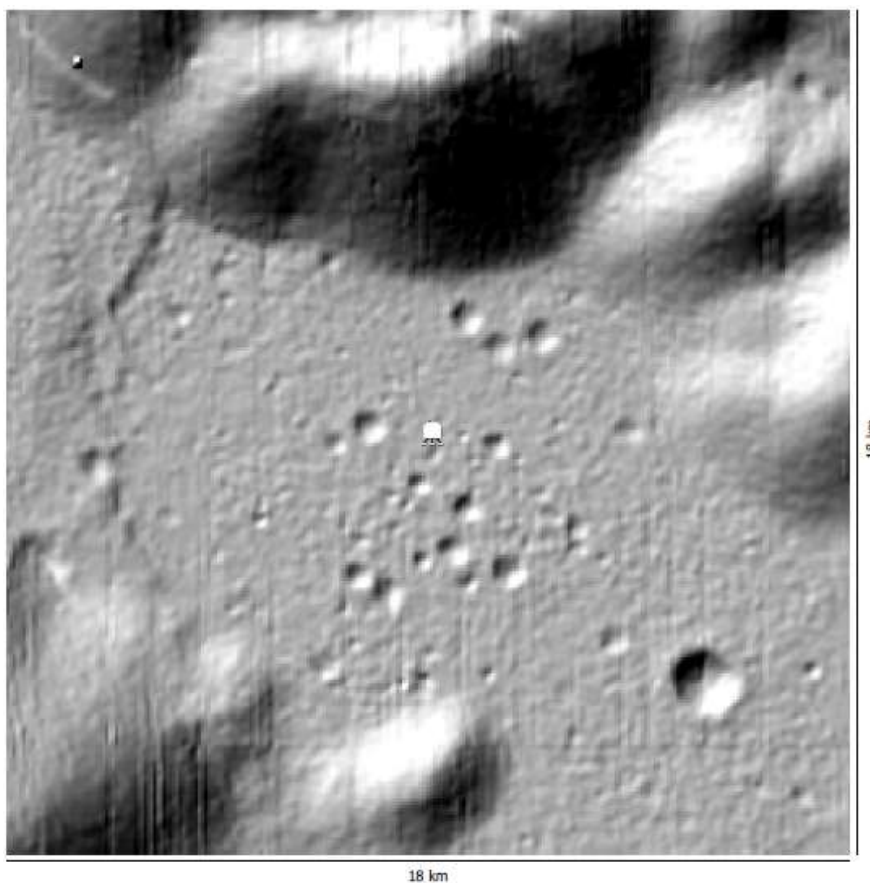


Figura 5.51. Mapa de sombras Apolo 17 (escala aproximada 1:178.500)

Cuenca visual

En el cálculo de la cuenca visual (ver Figura 5.52) desde el punto de alunizaje se puede observar la extensión de terreno que sería visible desde dicho punto para una altura de un observador de 2 metros aproximadamente. Las zonas visibles están representadas por un tono más claro sobre el modelo digital de elevaciones.

Se observa como los macizos son perfectamente visibles desde el punto de alunizaje, y como en las inmediaciones de dicho punto existen zonas no visibles que se corresponden con los cráteres de la zona.

Estas zonas se corresponden aproximadamente con la imagen panorámica captada por los astronautas desde la misma zona (ver Figura 5.53).

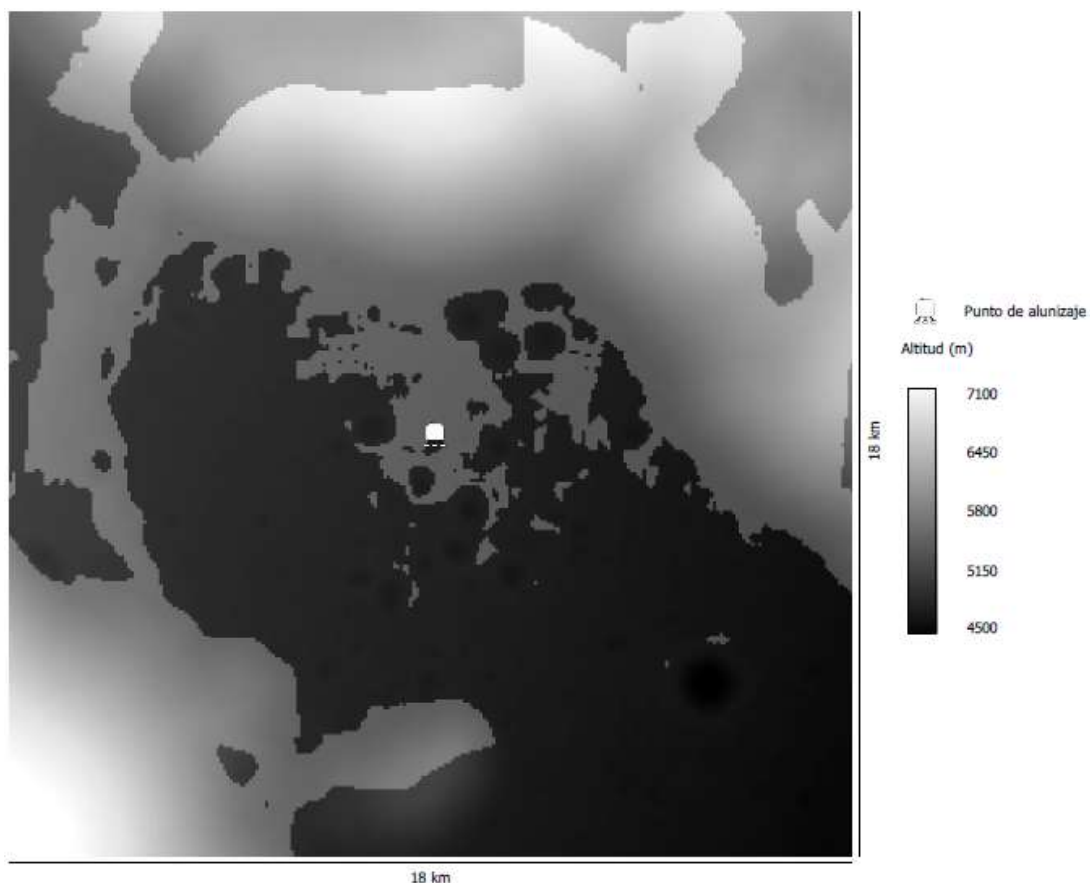


Figura 5.52. Cuenca visual Apolo 17. En tono claro las zonas visibles desde el punto de alunizaje (escala aproximada 1:178.500)



Figura 5.53. Imagen panorámica Apolo 17

Perfiles topográficos

Se han trazado cuatro perfiles en las direcciones Oeste-Este, Noroeste-Sureste, Norte-Sur y Noreste-Suroeste (ver Figura 5.54), en los que se observa perfectamente el relieve de la zona.

Un perfil más que interesante es el Norte-Sur ya que empieza en el macizo Norte para posteriormente cortar a la montaña Bear, poniendo de manifiesto las diferencias de altitud. También el perfil Noreste-Suroeste es interesante, pues se puede observar la profundidad del valle con respecto a los macizos que lo rodean. En el perfil Noroeste-Sureste se aprecia como el valle decrece en altitud en sentido Sureste.

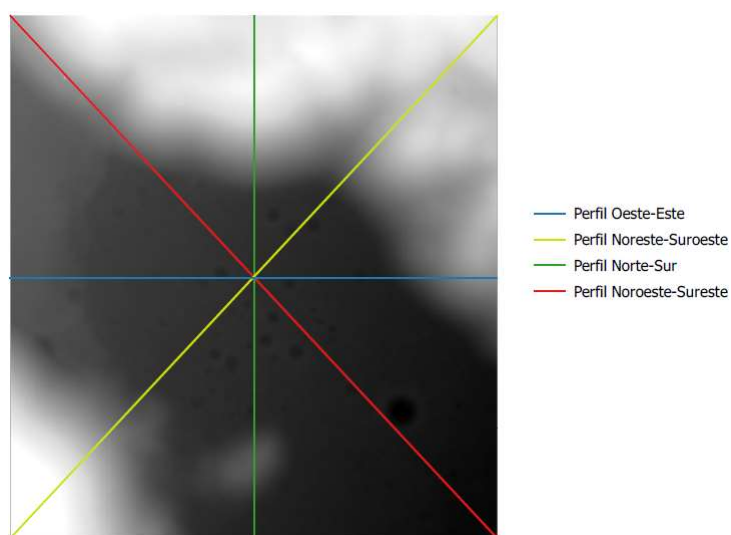
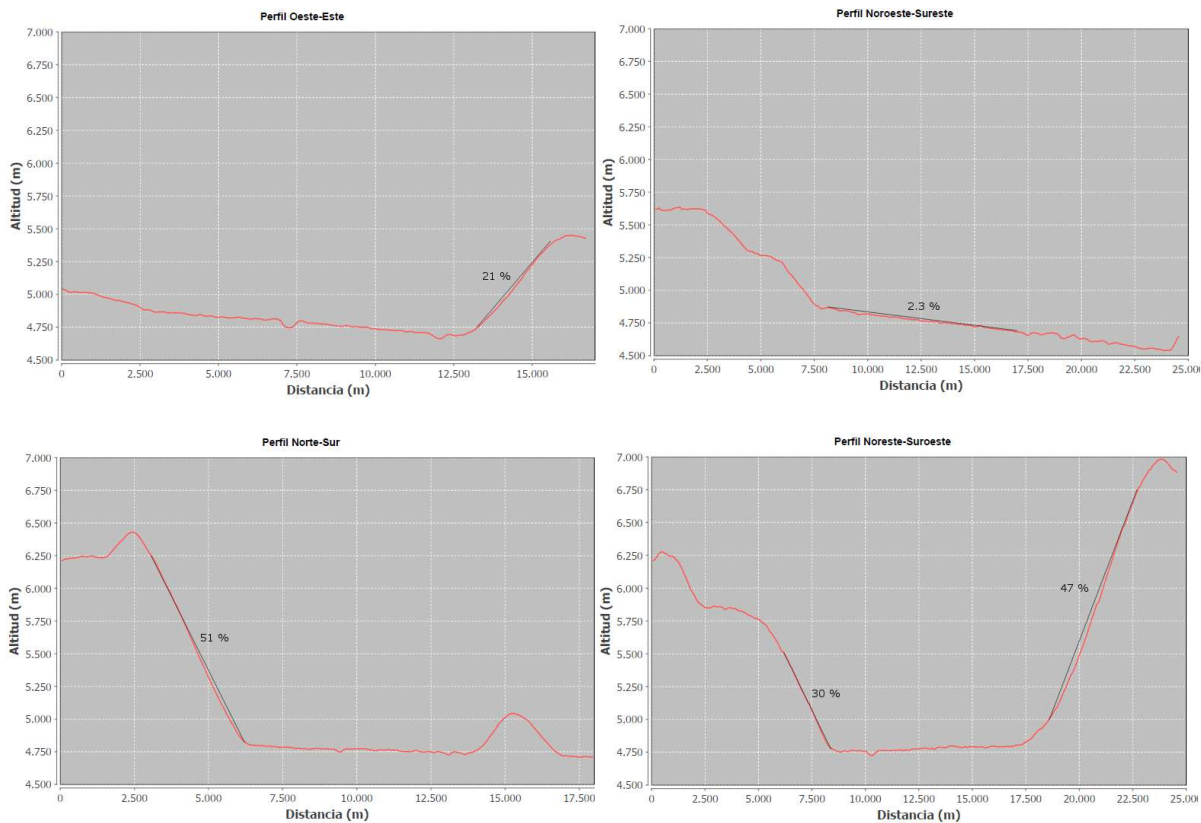


Figura 5.54. Perfiles topográficos Apolo 17



Como apoyo a este analisis se recomienda ver los mapas topograficos de la zona Apolo 17 en el “Anexo 1. Cartografía de las zonas de alunizaje”.

5.7. Análisis comparativo entre zonas de alunizaje

Las diferencias entre las características topográficas de las zonas de alunizaje de cada misión, una vez realizados los análisis, son evidentes, y concuerdan perfectamente con los criterios utilizados para la elección de las mismas.

Así, como se ve en la Tabla 5.7 de los parámetros estadísticos referentes a la altitud, las zonas de alunizaje de Apolo 11 y 12 son zonas sin apenas interés desde el punto de vista orográfico, pues ambas tienen un coeficiente de variación de la altitud inferior al 2%, una altitud media que no sobrepasa los 6.000 metros, y una diferencia entre la altitud máxima y mínima de 329,5 metros para la zona del Apolo 11 y de 170 metros para la zona del Apolo 12.

La zona del Apolo 14 se encuentra a una altitud mayor que las misiones anteriores, un coeficiente de variación con un valor también mínimo y un rango en altitudes algo mayor, 472 metros.

En Apolo 15, una de las zonas más interesantes, se ve como el coeficiente de variación ya aumenta a 5,627% y existe una variación entre la altitud máxima y mínima de 2.256 metros, la diferencia entre el fondo de la rima Hadley y el punto más alto del monte Hadley.

La zona del Apolo 16 es la de mayor altitud de todas las misiones Apolo, sin embargo, su coeficiente de variación y rango de altitudes es inferior a la misión Apolo 14.

Los parámetros de la zona de la última misión, Apolo 17, muestran la diferencia de altitudes dominada por los grandes macizos que rodean el valle Taurus-Littrow, llegando a un coeficiente de variación del 11% y un rango de altitudes de 2.661 metros, la mayor diferencia de las seis misiones con alunizaje del programa Apolo.

Parámetro	Apolo 11	Apolo 12	Apolo 14	Apolo 15	Apolo 16	Apolo 17
Máximo [m]	5637,500	6041,500	6589,000	7418,500	7992,000	7127,500
Mínimo [m]	5308,000	5871,000	6117,000	5162,500	7208,000	4466,500
Media [m]	5483,666	5973,857	6347,922	5560,606	7531,919	5207,995
Mediana [m]	5473,500	5975,500	6342,000	5474,500	7453,500	4955,500
Rango [m]	329,500	170,000	472,000	2256,000	784,000	2661,000
D. Estándar [m]	66,433	36,974	63,342	312,881	165,789	586,292
C. Variación [%]	1,211	0,619	0,998	5,627	2,201	11,258

Tabla 5.7. Parámetros estadísticos de altitud de las zonas de alunizaje

Respecto a la pendiente de cada zona de alunizaje, como se puede comprobar en la Tabla 5.8, se observa cómo las zonas de las dos primeras misiones, Apolo 11 y 12, son las que menos pendiente tienen, requisito prioritario a la hora de elegir dichas zonas, tal y como se especificó en el apartado 3.4 de este trabajo. Así, el Mar de la Tranquilidad tiene una pendiente media del 4,3 % y la pendiente que con mayor frecuencia se repite en la zona es el 1,2 %. El Océano de las Tormentas por su parte, tiene una pendiente media del 1.6 % y una moda de 0.7 %.

A partir de aquí se observa como la pendiente va aumentando conforme las zonas de alunizaje son más interesantes geológicamente. La pendiente alcanza valores medios que llegan a alcanzar el 19,9 % como es el caso de la zona de Apolo 17, el valle Taurus-Littrow flanqueado por los dos grandes macizos. Los valores de pendiente más frecuentes no superan en ningún caso el 3%, ya que a pesar de buscar zonas con una topografía característica a partir de la misión Apolo14, en todas las zonas existen áreas sin apenas pendiente debido a que la maniobra de alunizaje se debía llevar a cabo en zonas relativamente sin pendiente para facilitar el éxito de dicha maniobra.

Parámetro	Apolo 11	Apolo 12	Apolo 14	Apolo 15	Apolo 16	Apolo 17
Media [%]	4,3	1,6	8,5	13,2	11,2	19,9
Mediana [%]	3,2	1,3	7,0	4,1	8,7	13,7
Moda [%]	1,2	0,7	2,7	1,2	2,7	2,7

Tabla 5.8. Parámetros estadísticos de la pendiente de las zonas de alunizaje

Si nos fijamos en los análisis de la orientación de cada zona vemos perfectamente como hasta la zona de la misión Apolo 15 no existe una orientación predominante debido a la gran cantidad de impactos de cuerpos celestes de diversos tamaños y la inexistencia de grandes masas o elevaciones características.

Ya en la zona del Apolo 15, Hadley Rille, sí que se observa la uniformidad en el mapa de orientaciones (ver Figura 5.32) que se corresponde con la ladera del monte Hadley y el surco de la rima Hadley. Igualmente, en las zonas de Apolo 16 y 17, se observa una orientación irregular en las planicies excepto en las elevaciones y grandes cráteres.

En la Tabla 5.9 se presenta los valores de orientación más frecuentes para cada una de las zonas. Destacar los valores de Apolo 15 y 17, aquellas zonas cuya orografía es más característica, tienen el mismo valor para la moda, 135°.

Parámetro	Apolo 11	Apolo 12	Apolo 14	Apolo 15	Apolo 16	Apolo 17
Moda [°]	45	225	315	135	315	135

Tabla 5.9. Moda de los valores de orientación de cada zona

En cuanto análisis de visibilidad realizado para cada zona, comentar que este depende en gran parte de las características del terreno. De esta manera, observamos en la tabla 5.10 como los puntos visibles más lejanos están en las zonas con grandes elevaciones como son las de las misiones Apolo 15, 16 y 17. Por el contrario, si no hay grandes elevaciones en el terreno, el radio de visión disminuye considerablemente como se puede observar en las misiones Apolo 11, 12 y 14.

Parámetro	Apolo 11	Apolo 12	Apolo 14	Apolo 15	Apolo 16	Apolo 17
Distancia [m]	6814	8680	9923	12000	12500	11300

Tabla 5.10. Distancia máxima de visión desde los puntos de alunizaje

A continuación se muestran los perfiles superpuestos de las seis zonas de alunizaje para cada perfil, es decir, el perfil Oeste-Este (ver Figura 5.55), el perfil Noroeste-Sureste (ver Figura 5.56), el perfil Norte-Sur (ver Figura 5.57) y el perfil Noreste-Suroeste (ver Figura 5.58).

Se puede observar nuevamente, a la vista de estos perfiles, como las zonas de Apolo 15 y 17 son las que más desnivel tienen, y como las zonas de Apolo 11 y 12 se mantienen prácticamente como líneas rectas.

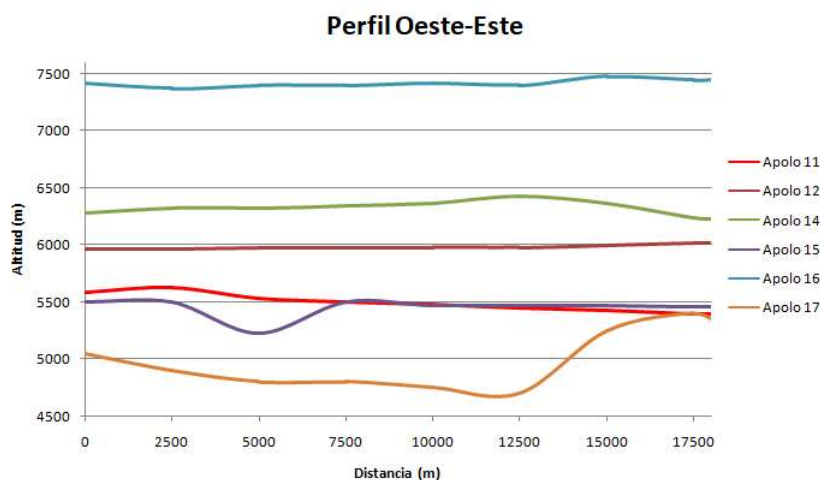


Figura 5.55. Perfiles Oeste-Este superpuestos

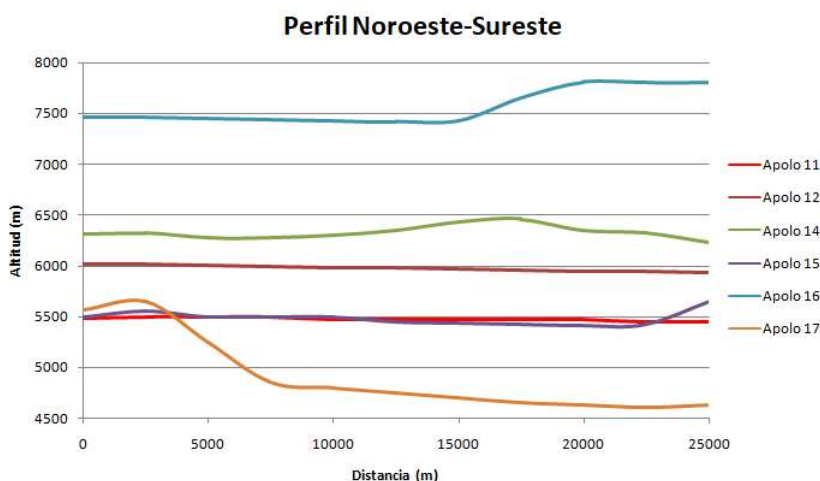


Figura 5.56. Perfiles Noroeste-Sureste superpuestos

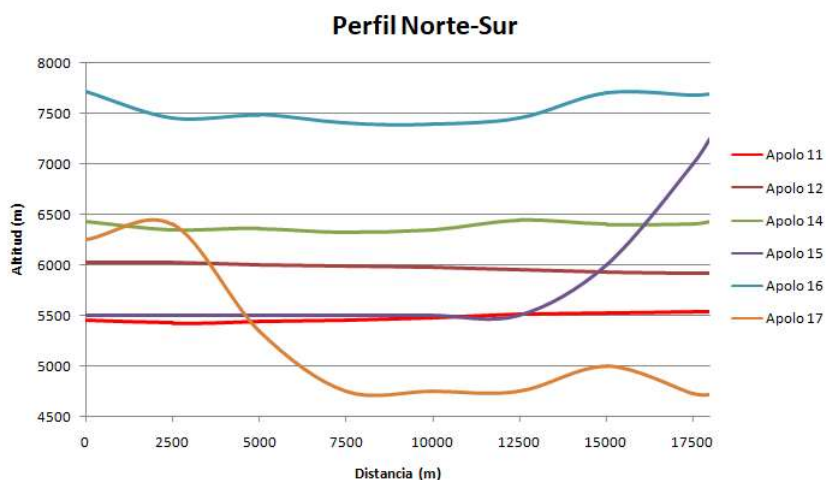


Figura 5.57. Perfiles Norte-Sur superpuestos

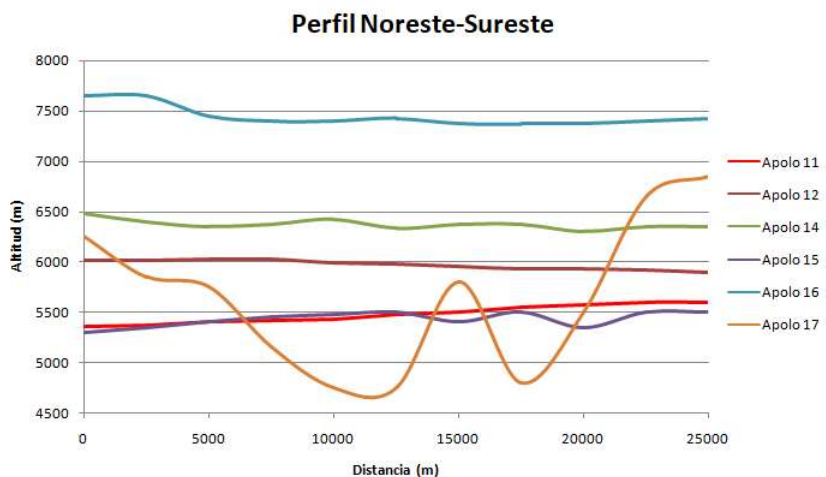


Figura 5.58. Perfiles Noreste-Suroeste superpuestos

6. CONCLUSIONES

La finalización del presente trabajo supone el cumplimiento del objetivo propuesto al inicio del mismo, de manera que se ha conseguido analizar las características topográficas de las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA.

Para alcanzar este objetivo se han lleva a cabo una serie de trabajos previos que han ayudado a entender y abordar de la mejor manera posible los diferentes problemas que han surgido durante la realización de este trabajo. Entre estos trabajos previos se encuentran la revisión de los datos geográficos lunares disponibles en la red, para así seleccionar los datos que mejor se adecuen al propósito final, el análisis topográfico de cada una de las zonas. También la elaboración de un resumen de las misiones Apolo, para entender principalmente qué criterios se tuvieron en cuenta, por parte de la NASA, en la elección de cada una de las zonas y qué condiciones orográficas debían tener estas zonas para facilitar la consecución de los objetivos de cada misión, lo cual ha sido de ayuda a la hora de entender los resultados de los análisis.

Para la realización de los análisis se han incorporado los datos geográficos lunares seleccionados a un Sistema de Información Geográfica con el que tratar dichos datos y llevar a cabo los diferentes procesamientos que han permitido analizar la topografía de cada zona. Cabe destacar como novedad en este paso, el cambio en el sistema de referencia para trabajar con estos datos ya que no se trata de información geográfica terrestre sino lunar y, por lo tanto, ha sido necesario definir un sistema de referencia para poder manejar dicha información.

Con respecto a los resultados de los análisis topográficos realizados, se ha comprobado como las características del terreno de cada una de las zonas se corresponden con las descritas en la fase de planificación de las misiones, y por las cuales se eligieron dichas zonas para los alunizajes. De manera que, las zonas de las misiones Apolo 11 y 12, Mar de la Tranquilidad y Océano de las Tormentas respectivamente, se caracterizan por la suavidad del terreno y la ausencia de grandes desniveles que facilitarían alunizajes de precisión, principal objetivo de estas

misiones. Después de los alunizajes exitosos de Apolo 11 y 12 se eligieron zonas geológicamente más interesantes, así la zona de la misión Apolo 14, la formación Fra Mauro, se caracteriza por estar compuesta de crestas y cerros no excesivamente altos entre los que existen valles ondulados. La zona de del Apolo 15, Rima Hadley, fue elegida por ser un lugar con múltiples características y a la luz del análisis se ha comprobado como dicha zona tiene diversas montañas así como una rima sinuosa con 300 metros de profundidad. La zona del Apolo 16, la formación Descartes, se caracteriza por ser un terreno ondulado y cubierto de cráteres. Y la zona del Apolo 17, el valle Taurus-Littrow, es un valle flanqueado por dos grandes macizos.

Finalmente, para dar apoyo a los análisis topográficos realizados se han elaborado diferentes mapas topográficos de cada una de las zonas a tres escalas diferentes, teniendo así tres niveles de detalle con los que visualizar la información. Esto ha servido para entender mejor las características topográficas de cada zona y para tener una primera toma de contacto con la cartografía planetaria.

REFERENCIAS

- BEYER, R.A. (2014). An introduction to the data and tools of planetary geomorphology. Sagan Center at the SETI Institute, EE.UU. Recuperado de <https://www.journals.elsevier.com/geomorphology>. Último acceso: 31 agosto 2017.
- BOSQUE, J. (1992). Sistemas de información geográfica. Madrid, España: Rialp, S.A.
- CHEN, J.L. (2014). How to find the Apollo landing sites. Gore, EE.UU: Springer.
- FELICÍSIMO, A.M. (1994). Modelos digitales del terreno: introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Pentalfa Ediciones.
- HARE, T.M. (2006). Lunar Geographic Information System (GIS) for Dataset Synthesis and Analysis. Flagstaff, EE.UU: Astrogeology Team, U.S. Geological Survey.
- HARE, T.M. (2015). Map-a-Planet 2 (MAP2) Tutorial. USGS Astrogeology. Recuperado de <https://astrogeology.usgs.gov/tools/map-a-planet-2>. Último acceso: 31 agosto 2017.
- HESS, W.; KOVACH, R.; GAST, P.W.; SIMONS, G. (2009). The exploration of the Moon. Recuperado de <https://www.scientificamerican.com/article/exploration-of-the-moon/>. Último acceso: 31 agosto 2017.
- KARACHEVTSEVA, I.P.; KOKHANOV, A.A.; RODIONOVA, ZH.F.; ZHARKOVA, A.YU.; ZUBAREV, A.E.; GAROV, A.S.; MATVEEV, E.V.; OBERST, J. (2015). Modern Methodology for Planetary Mapping. EuroCarto.
- KIRK, R.L. (2016). Planetary Cartography: what, how and why begin with where. 47th Lunar and Planetary Science Conference.

- ORDOÑEZ, I. (2012). Cartografía geológica de la Luna (Proyecto Fin de Carrera). Universidad del País Vasco.
- ORLOFF, R.W.; HARLAND, D.M. (2006). Apollo: The definitive Sourcebook. Springer Praxis.
- PEDZICH, P.; LATUSZEK, K. (2014). Planetary Cartography – history, source data, methodology. Department of Cartography, Warsaw University of Technology.
- PEDZICH, P.; LATUSZEK, K. (2014). Planetary Cartography – sample publications, cartographic projections, new challenges. Department of Cartography, Warsaw University of Technology.
- SNYDER, J.P. (1987). Map Projections: a working manual. U.S. Geological Survey Professional Paper 1395.

Referencias web

- Astrogeology Science Center. <https://astrogeology.usgs.gov/>. Último acceso: 31 agosto 2017.
- Clementine Project Information. <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/clementine.html>. Último acceso: 31 agosto 2017.
- Department of Space Indian Space Research Organisation. <http://www.isro.gov.in/>. Último acceso: 31 agosto 2017.
- Japan Aerospace Exploration Agency. <http://global.jaxa.jp/>. Último acceso: 31 agosto 2017.
- Lunar and Planetary Institute. <http://www.lpi.usra.edu/>. Último acceso: 31 agosto 2017.

Lunar Orbital Data Explorer. <http://ode.rsl.wustl.edu/moon/index.aspx>. Último acceso: 31 agosto 2017.

Lunar Reconnaissance Orbiter. <https://lunar.gsfc.nasa.gov/>. Último acceso: 31 agosto 2017.

Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. <http://lroc.sese.asu.edu/>. Último acceso: 31 agosto 2017.

Map a Planet 2. <https://astrogeology.usgs.gov/tools/map-a-planet-2>. Último acceso: 31 agosto 2017.

NASA. <https://www.nasa.gov/>. Último acceso: 31 agosto 2017.

Spatial Reference. <http://spatialreference.org/>. Último acceso: 31 agosto 2017.

Índice de figuras

Figura 1.1. Estructura del TFG	5
Figura 3.1. Mapa escala 1:25.000 (Mare Imbrium)	10
Figura 3.2. Portal de Astropedia	24
Figura 3.3. Funcionamiento de MAP2	25
Figura 3.4. Creación de productos en MAP2	26
Figura 3.5. Producto disponible en MAP2	27
Figura 3.6. Sección sobre la Luna en la web del LPI	28
Figura 3.7. Lunar Orbital Data Explorer	30
Figura 3.8. Satélite Sputnik I	31
Figura 3.9. Yuri Gagarin	32
Figura 3.10. John Kennedy en el discurso el 25 de mayo de 1961	33
Figura 3.11. Emblema del Programa Apolo	34
Figura 3.12. Módulos de comando y servicio, y sistema de escape	34
Figura 3.13. Módulo lunar	35
Figura 3.14. Cohete de lanzamiento Saturno V	35
Figura 3.15. Emblema Apolo 1	36
Figura 3.16. Tripulación Apolo 1	36
Figura 3.17. Emblema Apolo 7	38
Figura 3.18. Tripulación Apolo 7	38
Figura 3.19. Emblema Apolo 8	39
Figura 3.20. Tripulación Apolo 8	39
Figura 3.21. Imagen de la Tierra desde la órbita lunar de Apolo 8	39
Figura 3.22. Emblema Apolo 9	40
Figura 3.23. Tripulación Apolo 9	40
Figura 3.24. Emblema Apolo 10	41
Figura 3.25. Tripulación Apolo 10	41
Figura 3.26. Emblema Apolo 11	42
Figura 3.27. Tripulación Apolo 11	42
Figura 3.28. Buzz Aldrin junto al módulo lunar en la superficie lunar	44
Figura 3.29. Emblema Apolo 12	45
Figura 3.30. Tripulación Apolo 12	45
Figura 3.31. Emblema Apolo 13	47
Figura 3.32. Tripulación Apolo 13	47
Figura 3.33. Emblema Apolo 14	48
Figura 3.34. Tripulación Apolo 14	49
Figura 3.35. MET sobre la superficie lunar	49
Figura 3.36. Emblema Apolo 15	50
Figura 3.37. Tripulación Apolo 15	51
Figura 3.38. Rover lunar utilizado en la misión Apolo 15	51
Figura 3.39. Emblema Apolo 16	52

Figura 3.40. Tripulación Apolo 16.....	52
Figura 3.41. Emblema Apolo 17.....	53
Figura 3.42. Tripulación Apolo 17.....	54
Figura 3.43. Localización de los alunizajes del Programa Apolo.....	55
Figura 4.1. Definición de sistema de referencia.....	60
Figura 4.2. Moon Transverse Mercator en spatialreference.org.....	60
Figura 4.3. Vectorización del MDE.....	62
Figura 4.4. Polígono de la extensión de la capa.....	62
Figura 4.5. Estadísticas de la zona.....	63
Figura 4.6. Histograma de elevaciones.....	64
Figura 4.7. Filtro de paso bajo aplicado al modelo.....	65
Figura 4.8. Extracción de curvas de nivel.....	65
Figura 4.9. Curvado.....	66
Figura 4.10. Generación del mapa de pendientes.....	67
Figura 4.11. Mapa de pendientes.....	67
Figura 4.12. Generación mapa de orientaciones.....	68
Figura 4.13. Mapa de orientaciones.....	68
Figura 4.14. Generación mapa de sombras.....	69
Figura 4.15. Mapa de sombras.....	69
Figura 4.16. Generación raster de distancia.....	71
Figura 4.17. Raster de distancia.....	71
Figura 4.18. Corrección de esfericidad lunar.....	72
Figura 4.19. Generación cuenca visual.....	72
Figura 4.20. Cuenca visual.....	73
Figura 4.21. Perfiles topográficos.....	73
Figura 4.22. Generación de perfiles.....	74
Figura 4.23. Perfil Oeste-Este.....	74
Figura 4.24. Perfil Noroeste-Sureste.....	75
Figura 4.25. Perfil Norte-Sur.....	75
Figura 4.26. Perfil Noreste-Suroeste.....	75
Figura 5.1. Localización área de estudio Apolo 11.....	81
Figura 5.2. Histograma de elevaciones Apolo 11.....	82
Figura 5.3. Mapa de curvas de nivel Apolo 11.....	83
Figura 5.4. Mapa de pendientes Apolo 11.....	84
Figura 5.5. Mapa de orientaciones Apolo 11.....	85
Figura 5.6. Mapa de sombras Apolo 11.....	86
Figura 5.7. Cuenca visual Apolo 11.....	87
Figura 5.8. Imagen panorámica Apolo 11.....	87
Figura 5.9. Perfiles topográficos Apolo 11.....	88
Figura 5.10. Localización área de estudio Apolo 12.....	90
Figura 5.11. Histograma de elevaciones Apolo 12.....	91
Figura 5.12. Mapa de curvas de nivel Apolo 12.....	92
Figura 5.13. Mapa de pendientes Apolo 12.....	93
Figura 5.14. Mapa de orientaciones Apolo 12.....	94

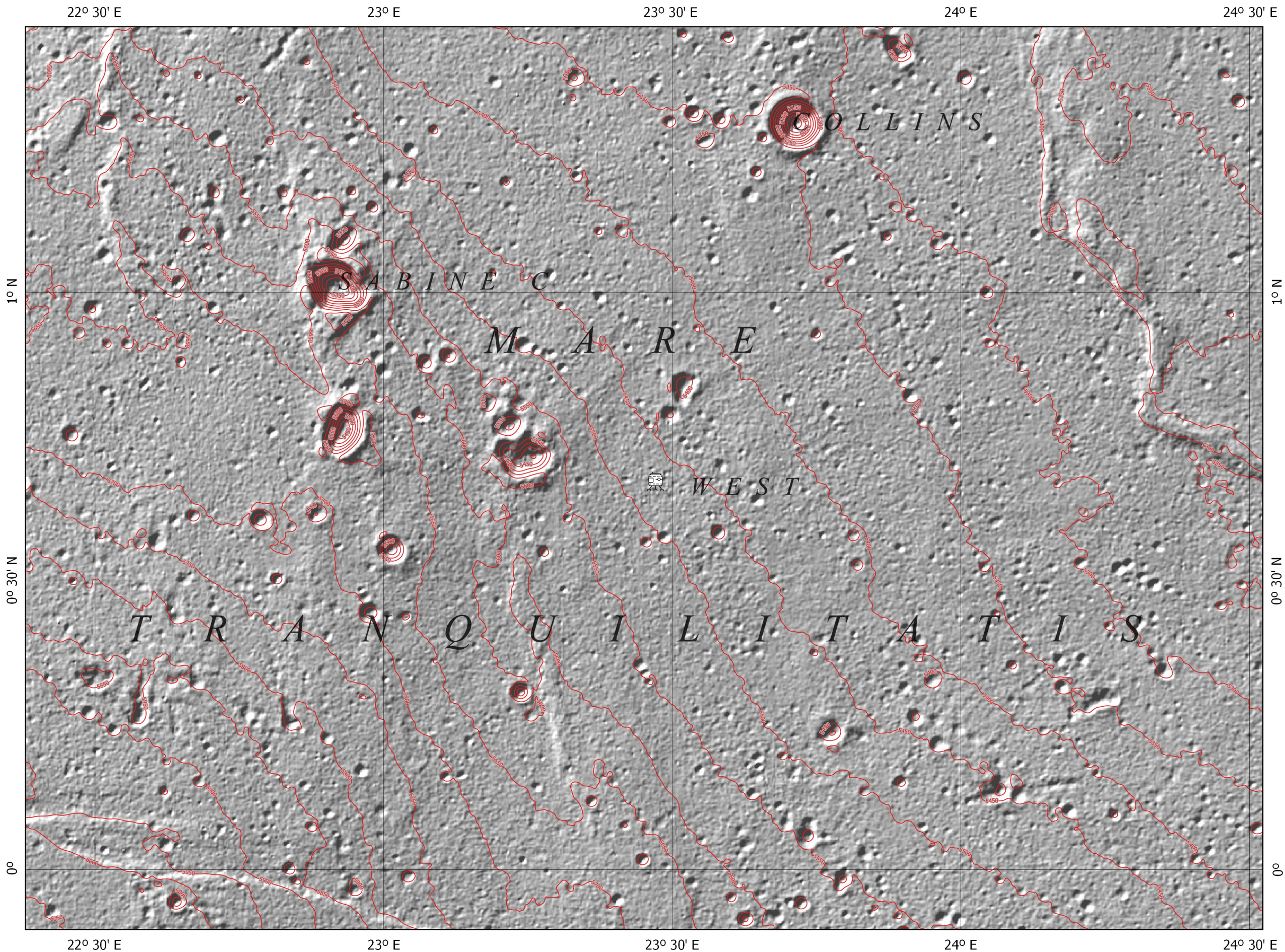
Figura 5.15. Mapa de sombras Apolo 12.....	95
Figura 5.16. Cuenca visual Apolo 12.....	96
Figura 5.17. Imagen panorámica Apolo 12.....	97
Figura 5.18. Perfiles topográficos Apolo 12.....	97
Figura 5.19. Localización área de estudio Apolo 14.....	99
Figura 5.20. Histograma de elevaciones Apolo 14.....	100
Figura 5.21. Mapa de curvas de nivel Apolo 14.....	101
Figura 5.22. Mapa de pendientes Apolo 14.....	102
Figura 5.23. Mapa de orientaciones Apolo 14.....	103
Figura 5.24. Mapa de sombras Apolo 14.....	104
Figura 5.25. Cuenca visual Apolo 14.....	105
Figura 5.26. Imagen panorámica Apolo 14.....	105
Figura 5.27. Perfiles topográficos Apolo 14.....	106
Figura 5.28. Localización área de estudio Apolo 15.....	108
Figura 5.29. Histograma de elevaciones Apolo 15.....	109
Figura 5.30. Mapa de curvas de nivel Apolo 15.....	110
Figura 5.31. Mapa de pendientes Apolo 15.....	111
Figura 5.32. Mapa de orientaciones Apolo 15.....	112
Figura 5.33. Mapa de sombras Apolo 15.....	113
Figura 5.34. Cuenca visual Apolo 15.....	114
Figura 5.35. Imagen panorámica Apolo 15.....	115
Figura 5.36. Perfiles topográficos Apolo 15.....	115
Figura 5.37. Localización área de estudio Apolo 16.....	117
Figura 5.38. Histograma de elevaciones Apolo 16.....	118
Figura 5.39. Mapa de curvas de nivel Apolo 16.....	119
Figura 5.40. Mapa de pendientes Apolo 16.....	120
Figura 5.41. Mapa de orientaciones Apolo 16.....	121
Figura 5.42. Mapa de sombras Apolo 16.....	122
Figura 5.43. Cuenca visual Apolo 16.....	123
Figura 5.44. Imagen panorámica Apolo 16.....	123
Figura 5.45. Perfiles topográficos Apolo 16.....	124
Figura 5.46. Localización área de estudio Apolo 17.....	126
Figura 5.47. Histograma de elevaciones Apolo 17.....	127
Figura 5.48. Mapa de curvas de nivel Apolo 17.....	128
Figura 5.49. Mapa de pendientes Apolo 17.....	129
Figura 5.50. Mapa de orientaciones Apolo 17.....	130
Figura 5.51. Mapa de sombras Apolo 17.....	131
Figura 5.52. Cuenca visual Apolo 17.....	132
Figura 5.53. Imagen panorámica Apolo 17.....	133
Figura 5.54. Perfiles topográficos Apolo 17.....	133
Figura 5.55. Perfiles Oeste-Este superpuestos.....	138
Figura 5.56. Perfiles Noroeste-Sureste superpuestos.....	138
Figura 5.57. Perfiles Norte-Sur superpuestos.....	139
Figura 5.58. Perfiles Noreste-Suroeste superpuestos.....	139

Índice de tablas

Tabla 4.1. Parámetros estadísticos	63
Tabla 5.1. Estadísticos descriptivos Apolo 11.....	82
Tabla 5.2. Estadísticos descriptivos Apolo 12.....	91
Tabla 5.3. Estadísticos descriptivos Apolo 14.....	100
Tabla 5.4. Estadísticos descriptivos Apolo 15.....	109
Tabla 5.5. Estadísticos descriptivos Apolo 16.....	118
Tabla 5.6. Estadísticos descriptivos Apolo 17.....	127
Tabla 5.7. Parámetros estadísticos de altitud de las zonas de alunizaje.....	136
Tabla 5.8. Parámetros estadísticos de la pendiente de las zonas de alunizaje.....	136
Tabla 5.9. Moda de los valores de orientación de cada zona	137
Tabla 5.9. Distancia máxima de visión desde los puntos de alunizaje	137

ANEXO 1. Cartografía de las zonas de alunizaje

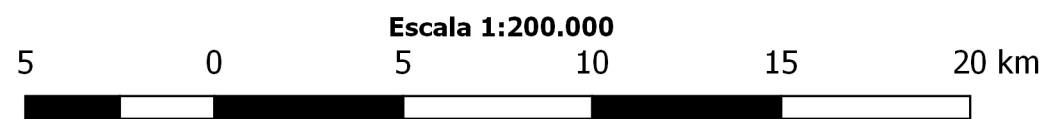
APOLO 11



Leyenda	
	Curvas de nivel
	Módulo lunar

Información geodésica
- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union)
- Proyección: Moon Transverse Mercator (IAU:30165).
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 50 m

Información adicional
- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 11 (NASA)
- Zona lunar: Mar de la tranquilidad
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 0° 40' 27.0" N, 23° 28' 23.3" E
- Conjunto de datos: Modelo digital de elevaciones derivado a partir de los datos procedentes del Lunar Orbiter Laser Altimeter a bordo de LRO (NASA) y de la cámara TC a bordo de SELENE (JAXA).
- Resolución MDE: 59 metros/pixel.
- Incertidumbre vertical MDE: 4 metros.



Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa

APOLO 11

23° 23' E

23° 27' E

23° 31' E

23° 35' E

0° 45' N

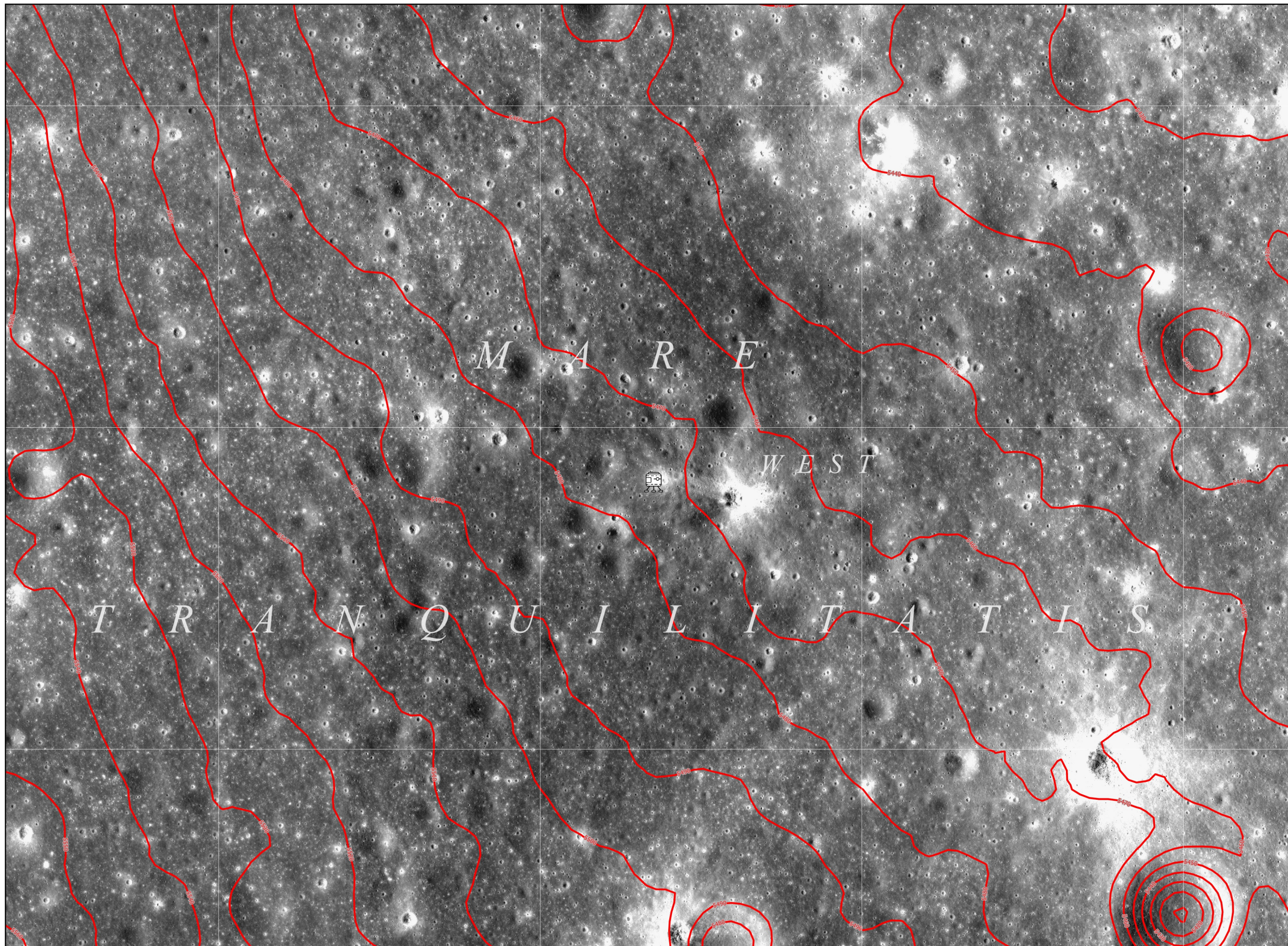
0° 44' N

0° 41' N

0° 41' N

0° 37' N

0° 37' N

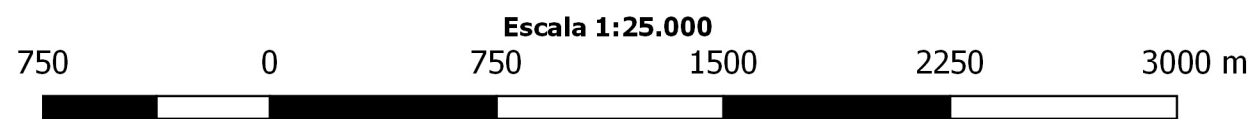


23° 23' E

23° 27' E

23° 31' E

23° 35' E



Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa

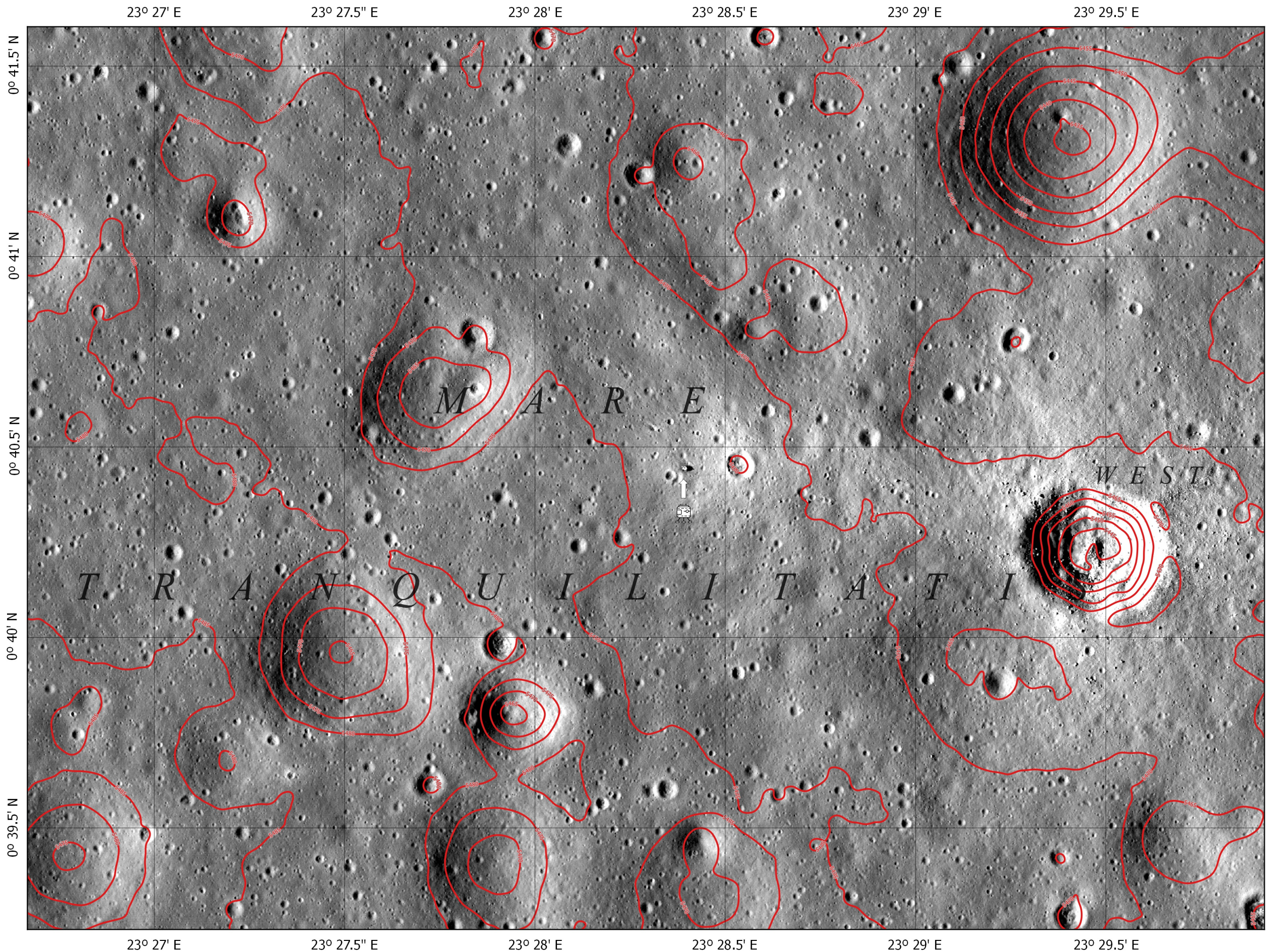


Leyenda	
	Curvas de nivel
	Módulo lunar

Información geodésica	
- Esferoide:	Moon 2000 (International Astronomical Union, IAU).
- Proyección:	Equirectangular
- Semieje mayor:	1730000 metros.
- Semieje menor:	1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel:	10 m

Información adicional	
- Producto:	mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión:	Apolo 11 (NASA)
- Zona lunar:	Mar de la tranquilidad
- Coordenadas selenográficas del alunizaje:	0° 40' 27.0" N, 23° 28' 23.3" E
- Conjunto de datos:	Modelo digital de elevaciones procedente de observaciones LOLA a bordo del LRO (NASA) coregistradas con observaciones de la cámara TC a bordo de SELENA (JAXA) y mosaico de imágenes de alta resolución derivados de pares estereoscópicos de las cámaras NAC (NACL y NACR) a bordo del Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO).

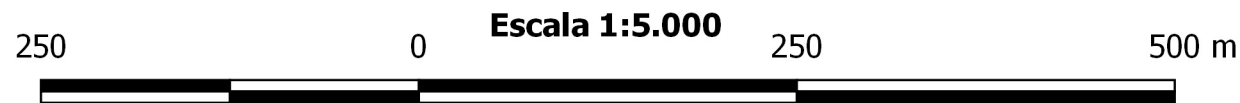
APOLO 11



Leyenda	
	Curvas de nivel
	Módulo lunar

Información geodésica	
- Esferoide:	Moon 2000 (International Astronomical Union, IAU).
- Proyección:	Equirectangular
- Semieje mayor:	1730000 metros.
- Semieje menor:	1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel:	5 m

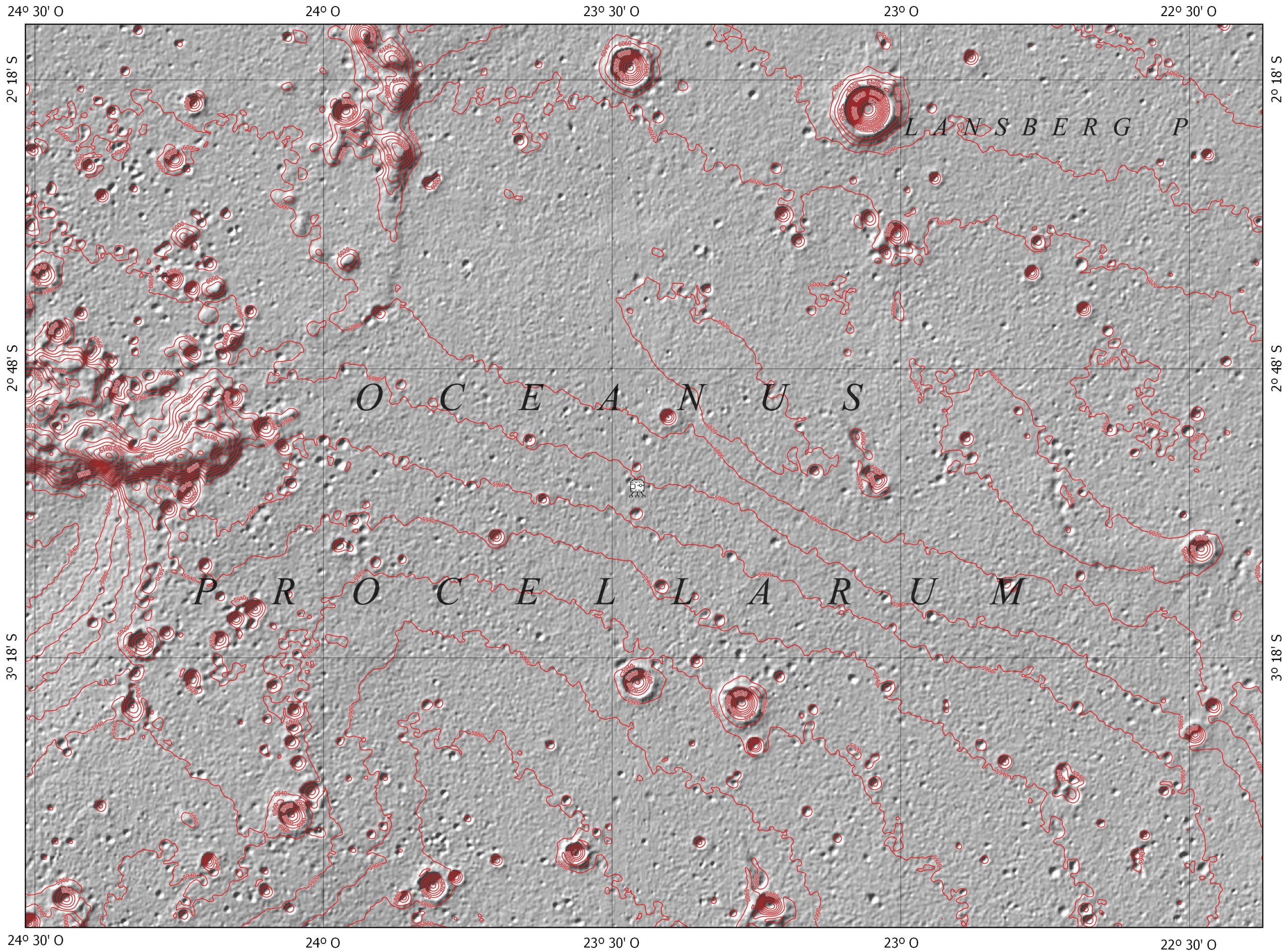
Información adicional	
- Producto:	mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión:	Apolo 11 (NASA)
- Zona lunar:	Mar de la tranquilidad
- Coordenadas selenográficas del alunizaje:	0° 40' 27.0" N, 23° 28' 23.3" E
- Conjunto de datos:	Modelo digital del terreno y ortofotografía de alta resolución derivados de pares estereoscópicos de las cámaras NAC (NACL y NACR) a bordo del Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO).
- Resolución MDT:	2 metros/píxel
- Resolución Ortofoto:	0.5 metros/píxel





Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa



APOLO 12



Leyenda

-  Curvas de nivel
-  Módulo lunar

Información geodésica

- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union).
- Proyección: Moon Transverse Mercator (IAU:30165).
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 20 m

Información adicional

- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 12 (NASA)
- Zona lunar: Océano de las tormentas.
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 3° 0' 42" S, 23° 25' 19" O
- Conjunto de datos: Modelo digital de elevaciones derivado de los datos procedentes del Lunar Orbiter Laser Altimeter a bordo de LRO (NASA) y de la cámara TC a bordo de SELENE (JAXA)
- Resolución MDE: 59 metros/pixel
- Incertidumbre vertical MDE: 4 metros.

24° 30' O 24° O 23° 30' O 23° O 22° 30' O

2° 18' S

2° 48' S

2° 18' S

3° 18' S

2° 48' S

2° 18' S

24° 30' O 24° O 23° 30' O 23° O 22° 30' O

Escala 1:200.000



Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa

APOLO 12

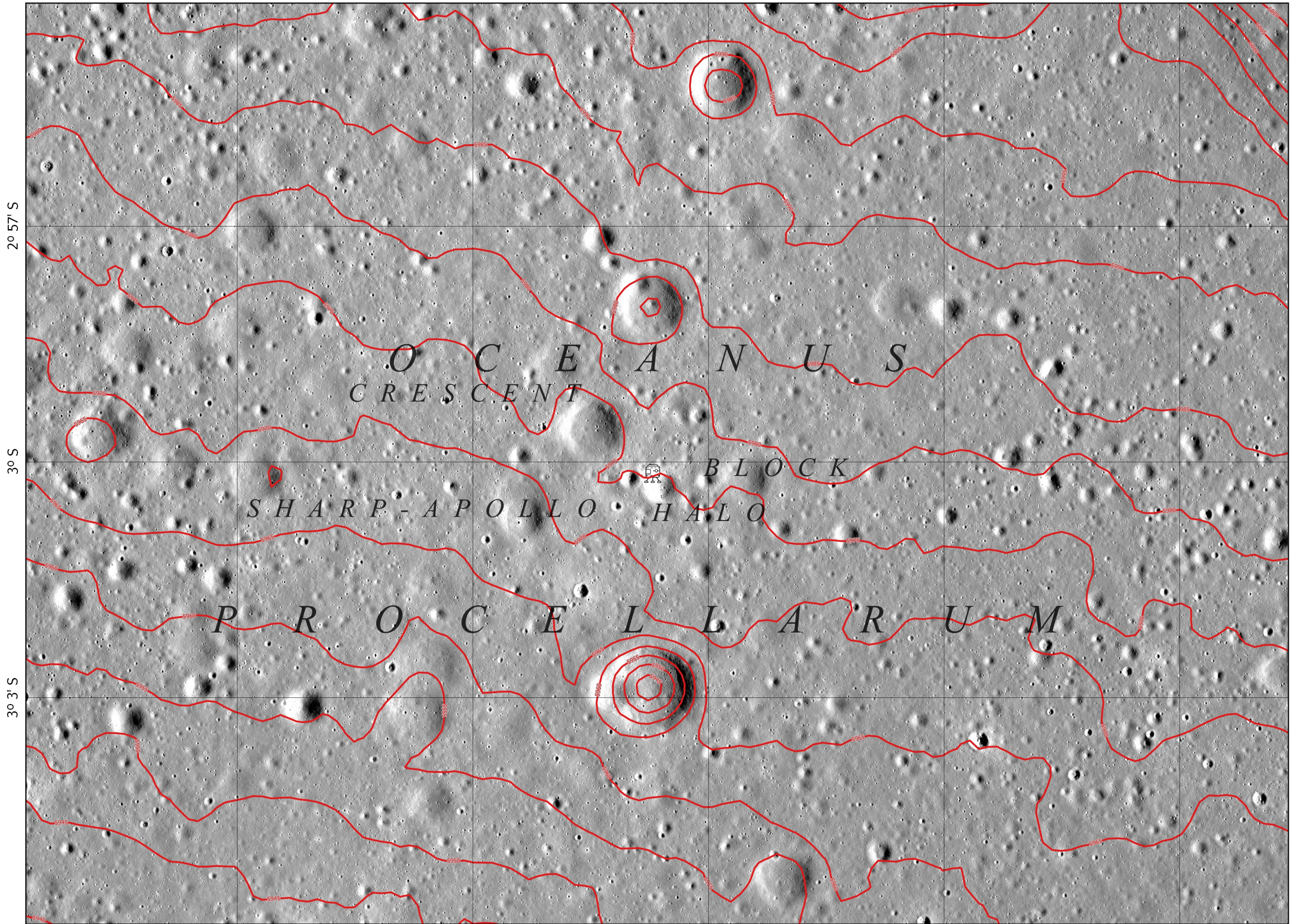
23° 30' O

23° 27' O



23° 24' O

23° 21' O

23° 18' O



Leyenda

-  Curvas de nivel
-  Módulo lunar

Información geodésica

- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union, IAU).
- Proyección: Equirectangular
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 5 m.

Información adicional

- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 12 (NASA)
- Zona lunar: Océano de las tormentas.
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 3° 0' 42" S; 23° 25' 19" O
- Conjunto de datos: Modelo digital de elevaciones derivado de observaciones LOLA a bordo del LRO (NASA) coregistradas con observaciones de la cámara TC a bordo de SELENA (JAXA) y mosaico de imágenes de alta resolución derivados de pares estereoscópicos de las cámaras NAC a bordo de LRO.
- Resolución MDE: 59 m/pixel
- Resolución Mosaico: 1.4 m/pixel

23° 30' O

23° 27' O

23° 24' O

23° 21' O

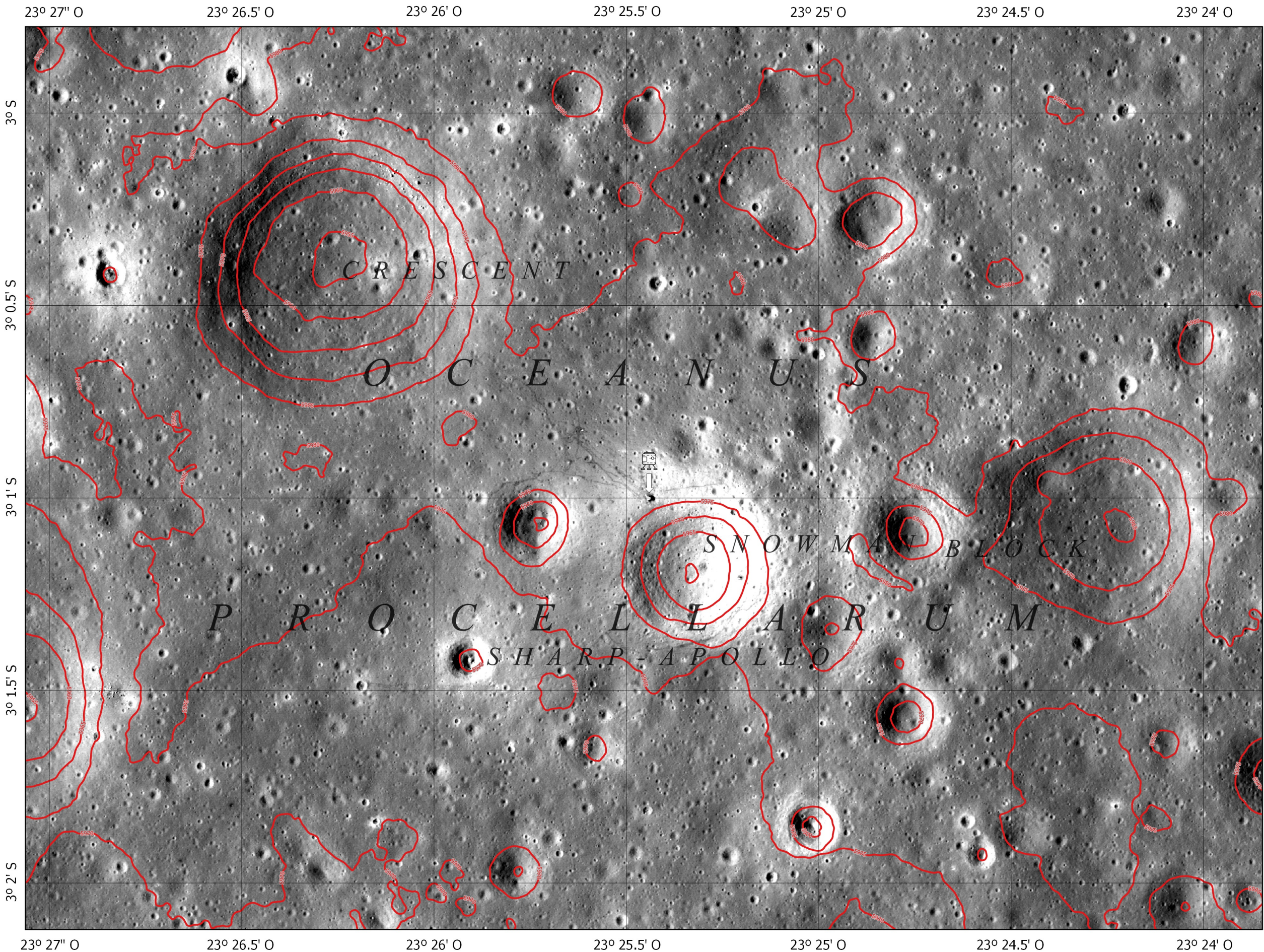
23° 18' O

Escala 1:25.000

750 0 750 1500 2250 3000 m

Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa

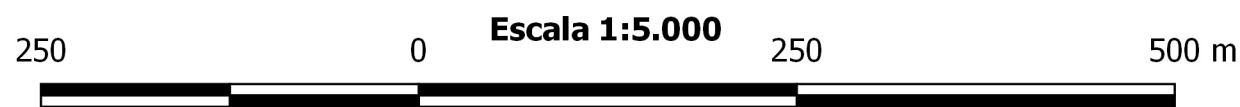
APOLO 12



Leyenda	
	Curvas de nivel
	Módulo lunar

Información geodésica	
- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union, IAU).	
- Proyección: Equirectangular	
- Semieje mayor: 1730000 metros.	
- Semieje menor: 1730000 metros.	
- Equidistancia curvas de nivel: 5 m.	

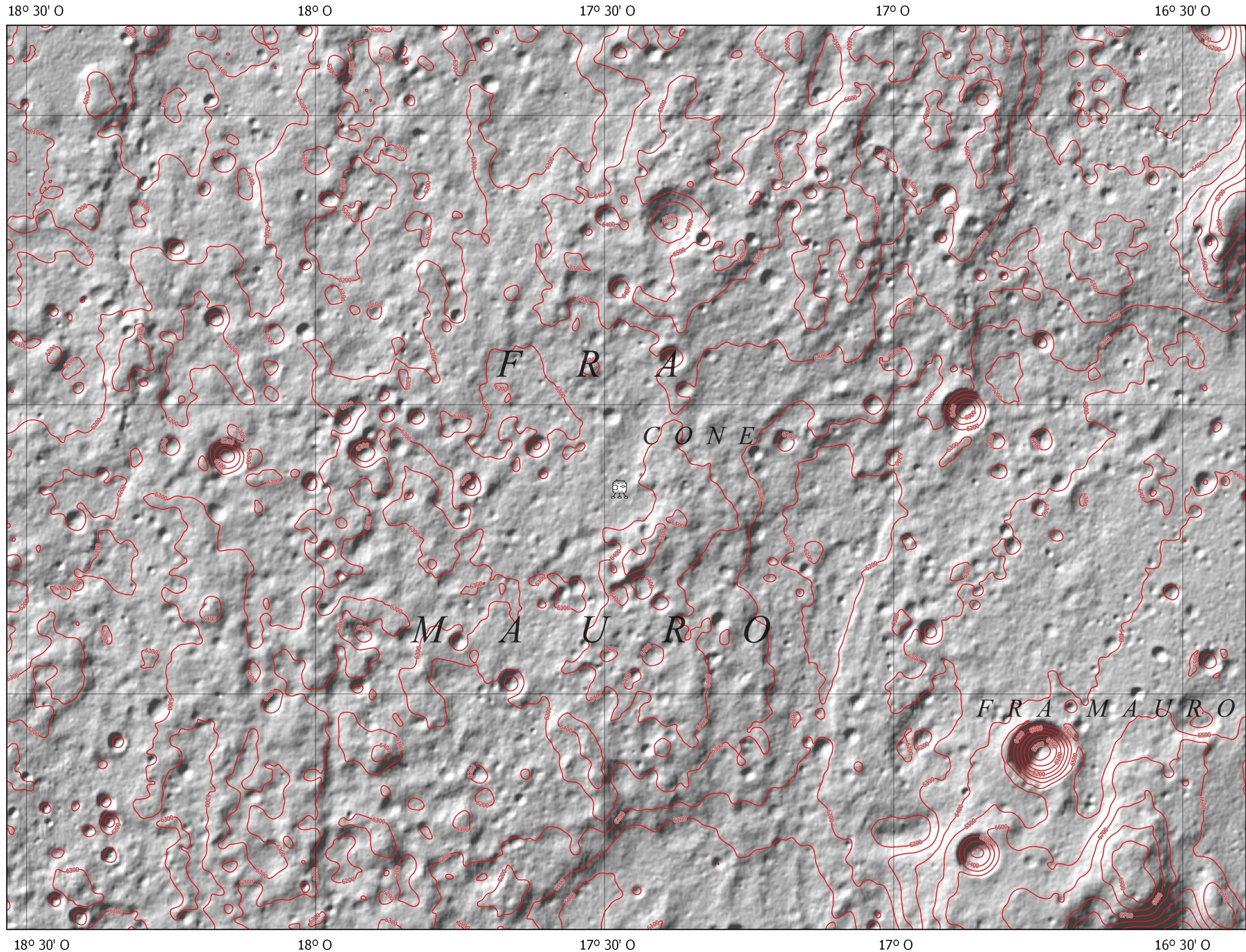
Información adicional	
- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".	
- Misión: Apolo 12 (NASA)	
- Zona lunar: Océano de las tormentas	
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 3° 0' 42" S, 23° 25' 19" O	
- Conjunto de datos: Modelo digital del terreno y ortofotografía de alta resolución derivados de pares estereoscópicos de las cámaras NAC (NACL y NACR) a bordo del Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO).	
- Resolución MDT: 2 metros/pixel	
- Resolución Ortofoto: 0.5 metros/pixel	





Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa



APOLO 14



Leyenda

-  Curvas de nivel
-  Módulo lunar

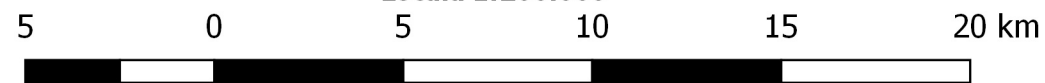
Información geodésica

- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union).
- Proyección: Moon Transverse Mercator (IAU:30165).
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 100 m

Información adicional

- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 14 (NASA)
- Zona lunar: Fra Mauro.
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 3° 38' 45" S, 17° 28' 19" O
- Conjunto de datos: Modelo digital de elevaciones derivado de los datos procedentes del Lunar Orbiter Laser Altimeter a bordo de LRO (NASA) y de la cámara TC a bordo de SELENE (JAXA)
- Resolución MDE: 59 metros/píxel
- Incertidumbre vertical MDE: 4 metros.

Escala 1:200.000



Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa

APOLO 14

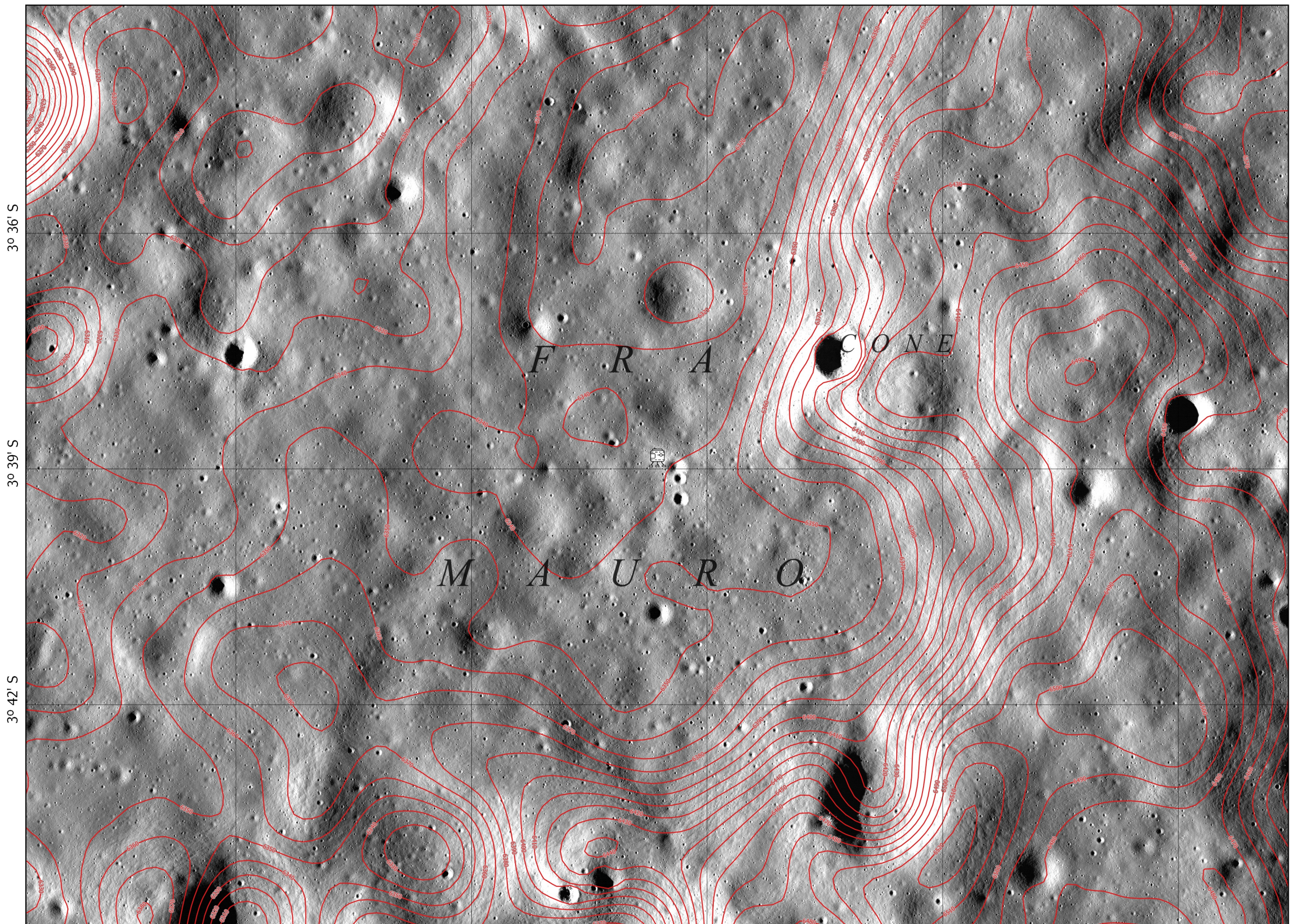
17° 34' O

17° 31' O

17° 28' O

17° 25' O

17° 22' O



3° 36' S

3° 39' S

3° 42' S

3° 36' S

3° 39' S

3° 42' S

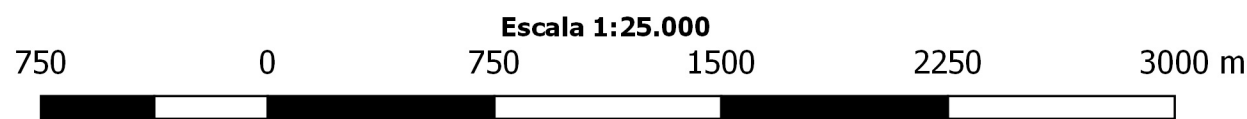
17° 34' O

17° 31' O

17° 28' O

17° 25' O

17° 22' O



Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa



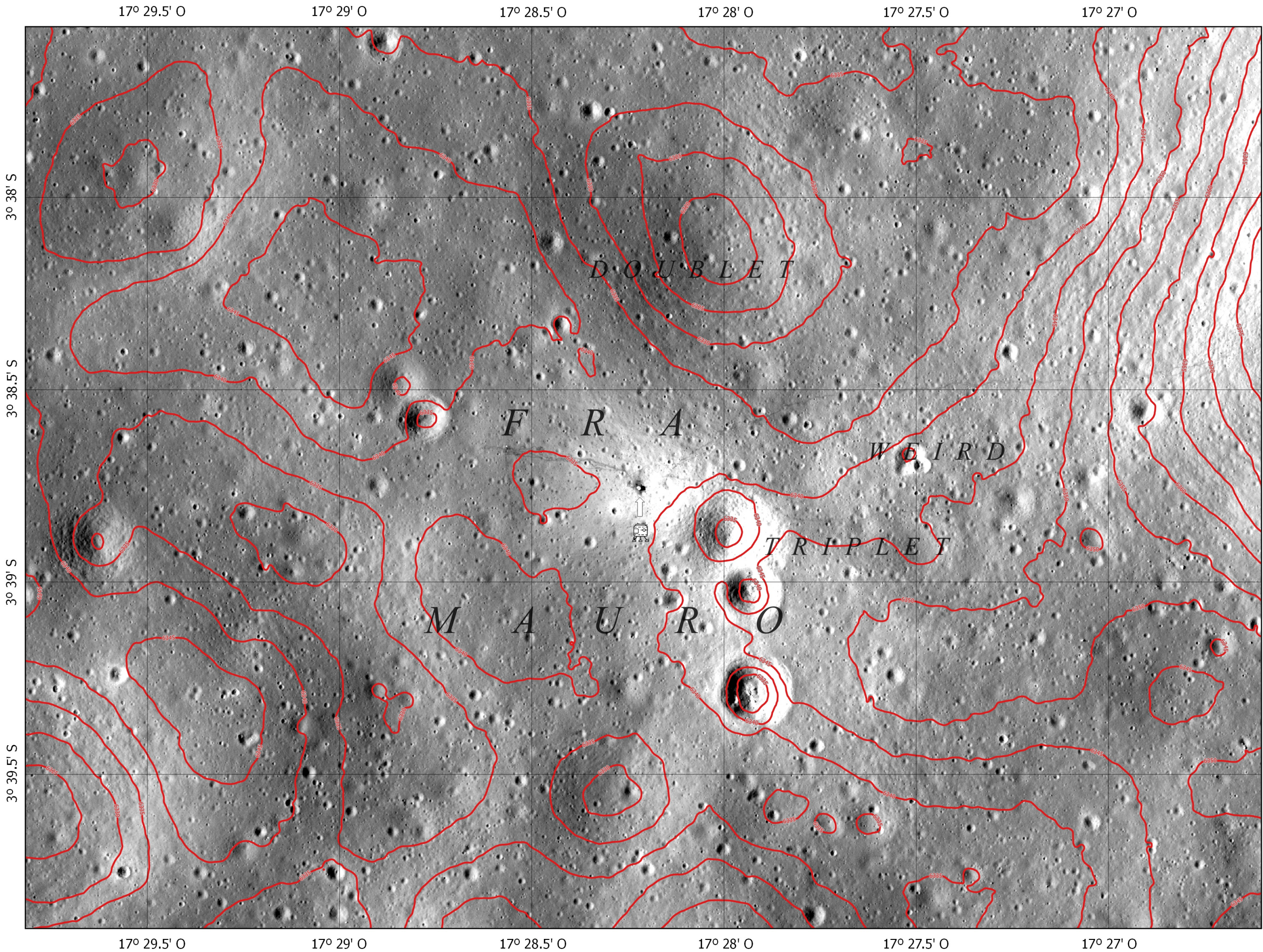
Leyenda	
	Curvas de nivel
	Módulo lunar

Información geodésica	
- Esferoide:	Moon 2000 (International Astronomical Union, IAU).
- Proyección:	Equirectangular
- Semieje mayor:	1730000 metros.
- Semieje menor:	1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel:	10 m

Información adicional	
- Producto:	mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión:	Apolo 14 (NASA)
- Zona lunar:	Fra Mauro
- Coordenadas selenográficas del alunizaje:	3° 38' 45" S; 17° 28' 19" O
- Conjunto de datos:	Modelo digital de elevaciones derivado de observaciones LOLA a bordo del LRO (NASA) coregistradas con observaciones de la cámara TC a bordo de SELENA (JAXA) y mosaico de imágenes de alta resolución derivados de pares estereoscópicos de las cámaras NAC a bordo de LRO.
- Resolución MDE:	59 m/píxel
- Resolución Mosaico:	1.1 m/píxel



APOLO 14



Leyenda

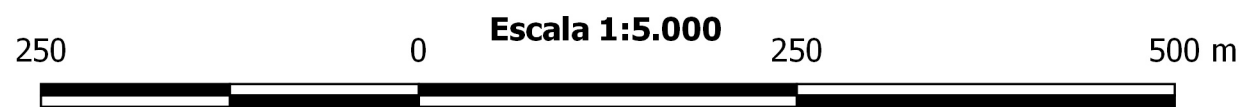
- Curvas de nivel
- Módulo lunar

Información geodésica

- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union, IAU).
- Proyección: Equirectangular
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 5 m

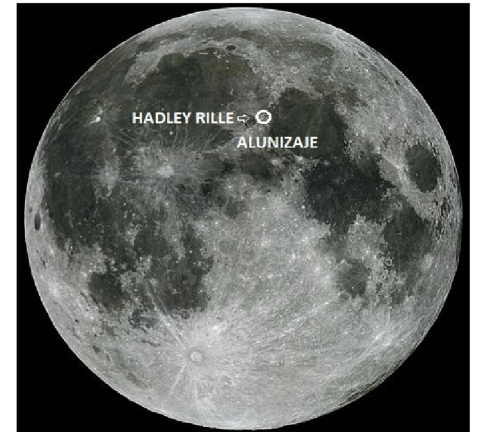
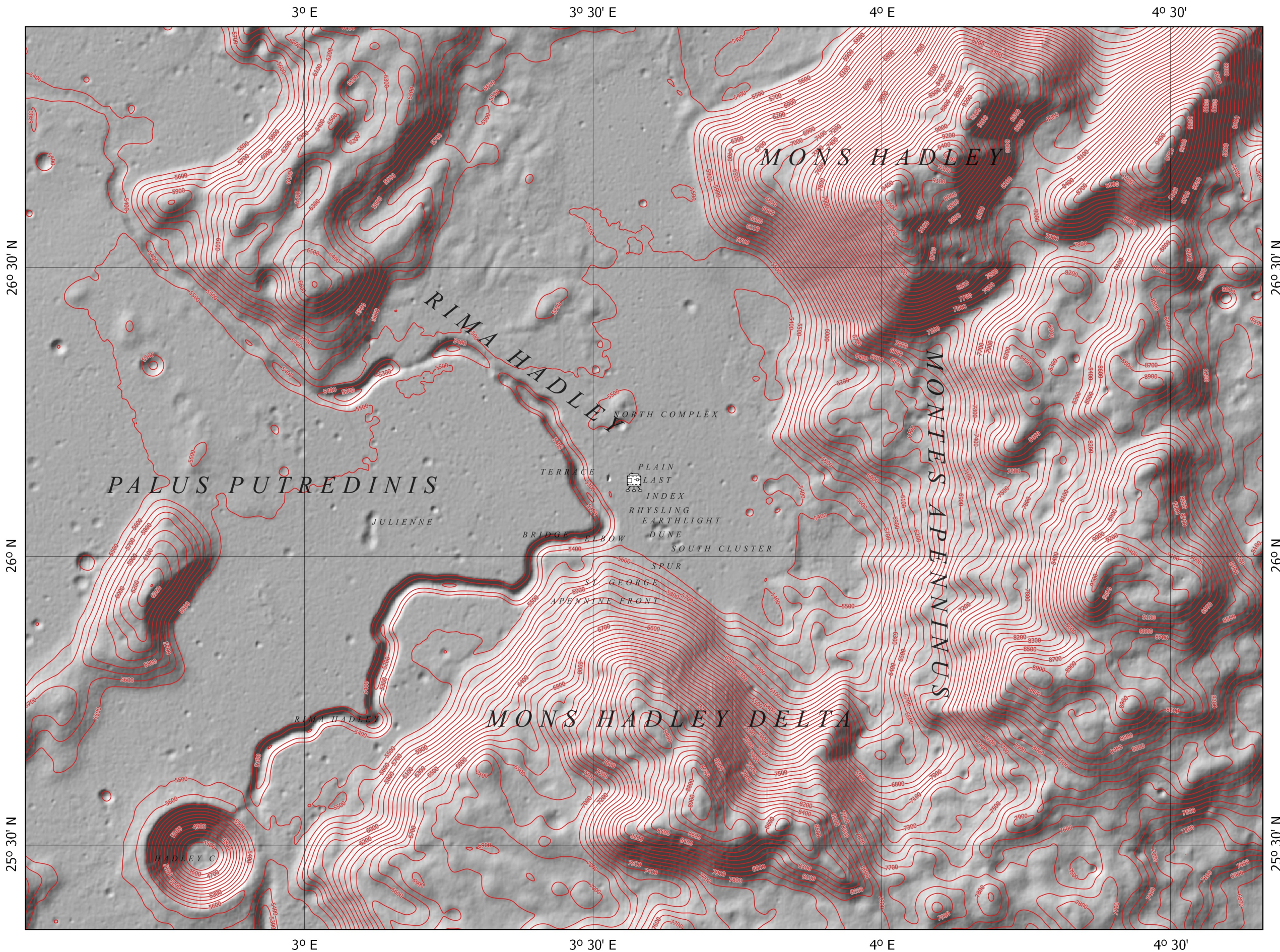
Información adicional

- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 14 (NASA)
- Zona lunar: Fra Mauro
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 3° 38' 45" S, 17° 28' 19" O
- Conjunto de datos: Modelo digital del terreno y ortofotografía de alta resolución derivados de pares estereoscópicos de las cámaras NAC (NACL y NACR) a bordo del Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO).
- Resolución MDT: 2 metros/píxel
- Resolución Ortofoto: 0.5 metros/píxel





Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa

APOLO 15



Leyenda

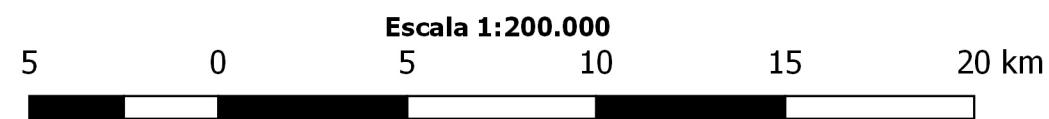
-  Curvas de nivel
-  Módulo lunar

Información geodésica

- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union).
- Proyección: Moon Transverse Mercator (IAU:30165).
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 100 m

Información adicional

- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 15 (NASA)
- Zona lunar: Hadley Rille.
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 26° 7' 57" N, 3° 38' 0" E
- Conjunto de datos: Modelo digital de elevaciones derivado de los datos procedentes del Lunar Orbiter Laser Altimeter a bordo de LRO (NASA) y de la cámara TC a bordo de SELENE (JAXA)
- Resolución MDE: 59 metros/pixel
- Incertidumbre vertical MDE: 4 metros.



Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa

APOLO 15

3° 32' E

3° 35' E

3° 38' E

3° 41' E

3° 44' E

26° 11' N

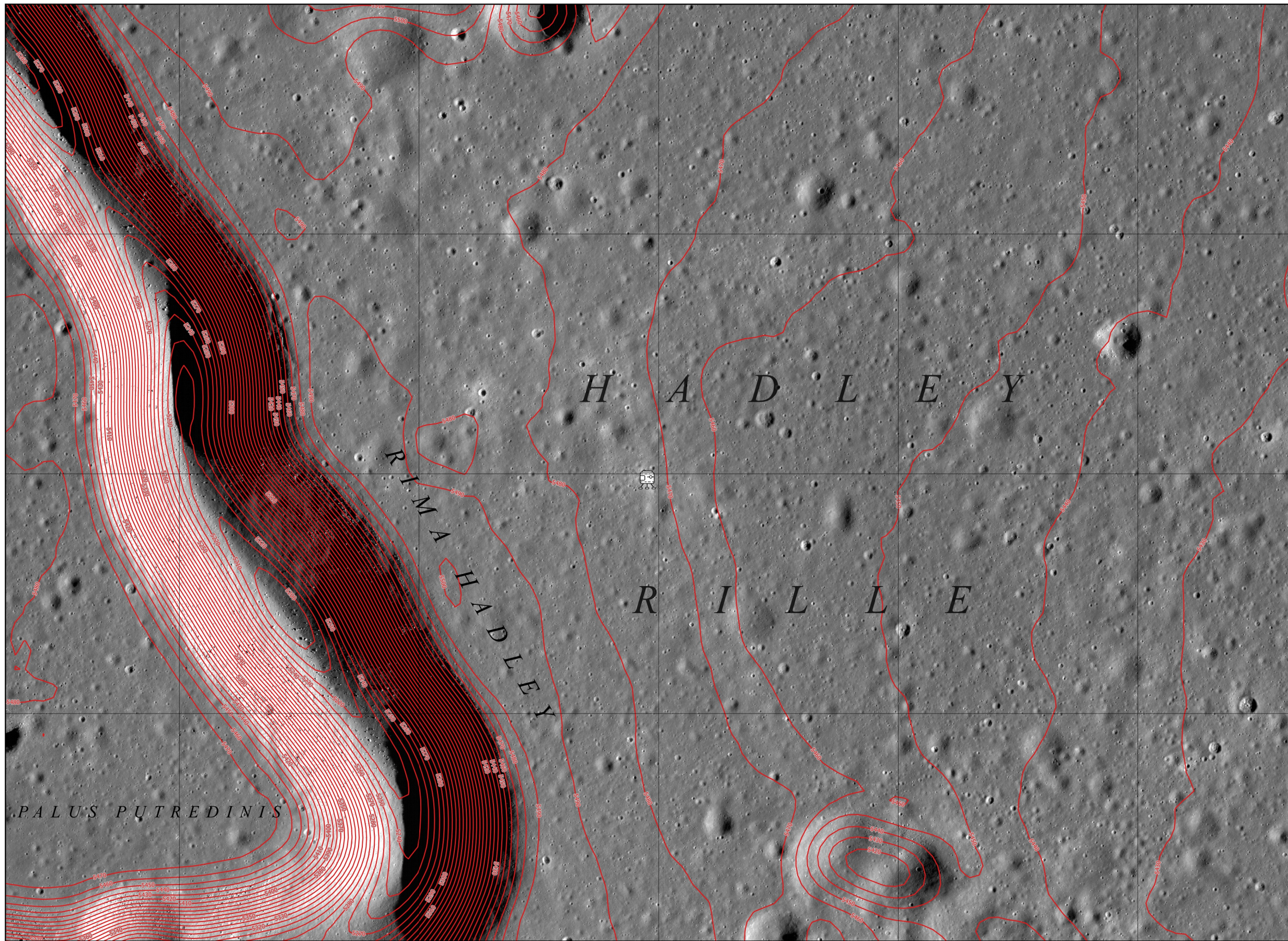
26° 8' N

26° 5' N



26° 11' N

26° 8' N

26° 5' N



Leyenda

-  Curvas de nivel
-  Módulo lunar

Información geodésica

- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union, IAU).
- Proyección: Equirectangular
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 10 m

Información adicional

- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 15 (NASA)
- Zona lunar: Hadley Rille.
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 26° 7' 57" N, 3° 38' 0" E
- Conjunto de datos: Modelo digital de elevaciones derivado de observaciones LOLA a bordo del LRO (NASA) coregistradas con observaciones de la cámara TC a bordo de SELENA (JAXA) y mosaico de imágenes de alta resolución derivados de pares estereoscópicos de las cámaras NAC a bordo de LRO.
- Resolución MDE: 59 m/pixel
- Resolución Mosaico: 1.4 m/pixel

3° 32' E

3° 35' E

3° 38' E

3° 41' E

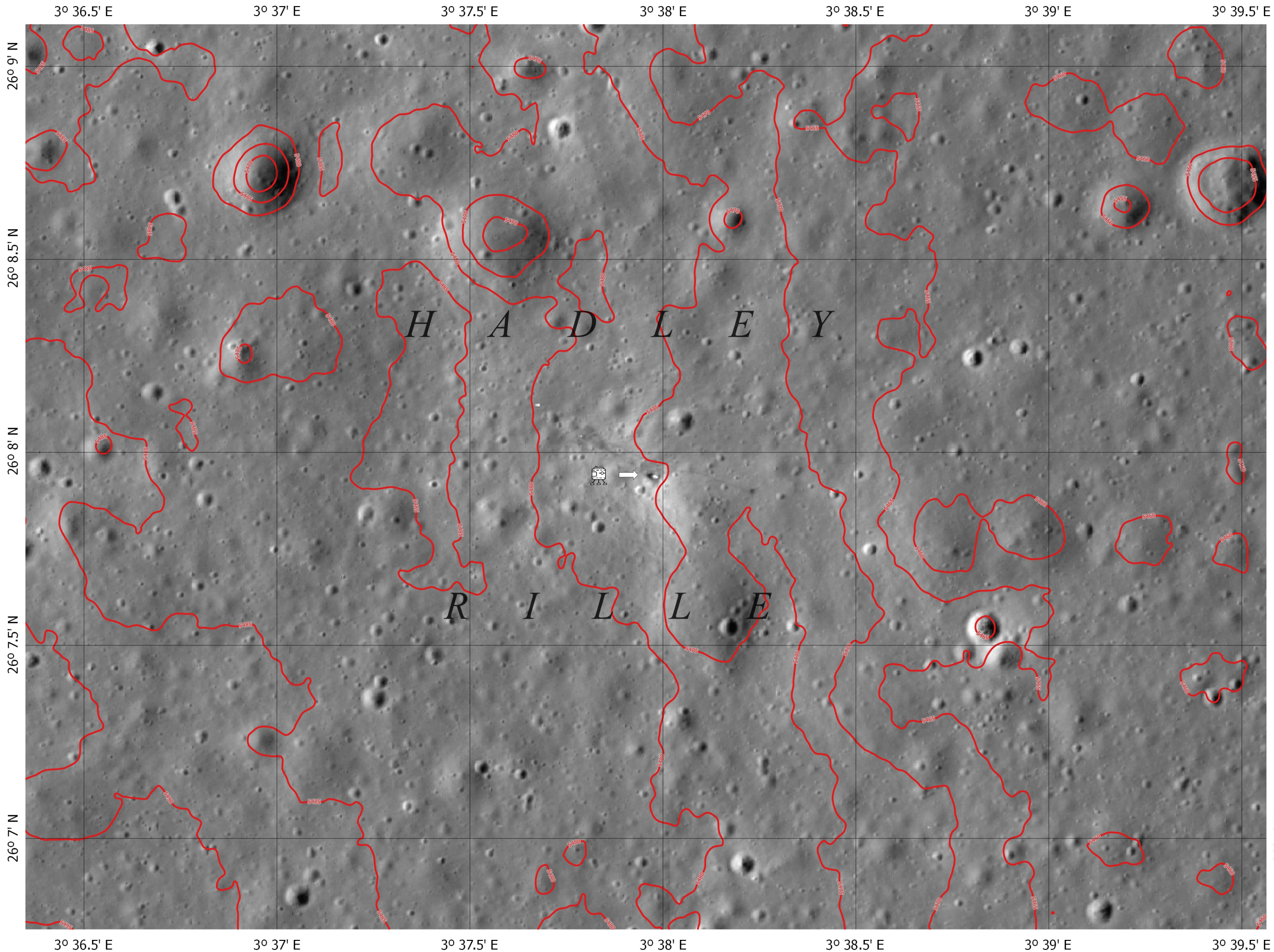
3° 44' E

Escala 1:25.000





Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa

APOLO 15



Leyenda

-  Curvas de nivel
-  Módulo lunar

Información geodésica

- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union, IAU).
- Proyección: Equirectangular
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 5 m

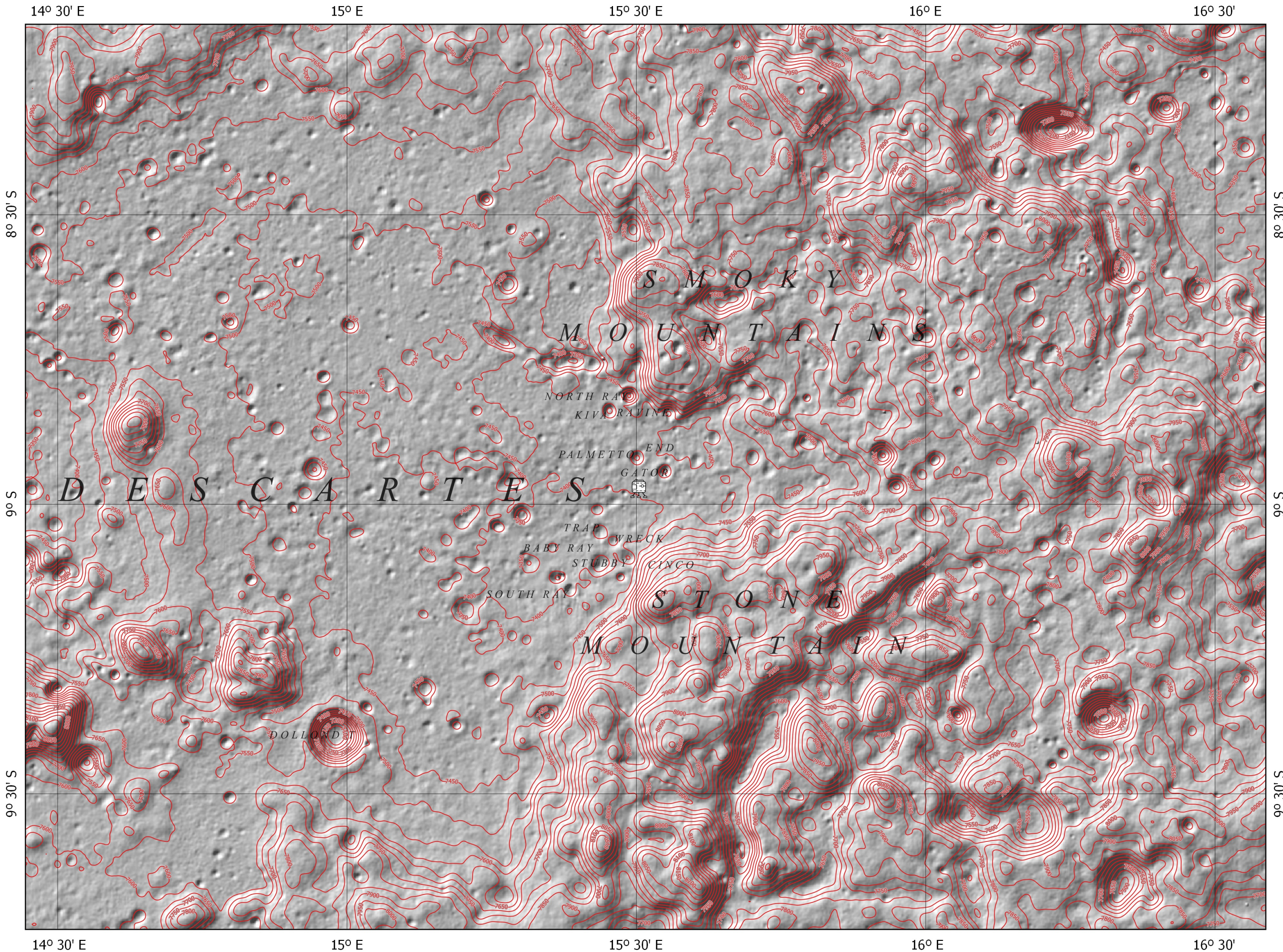
Información adicional

- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 15 (NASA)
- Zona lunar: Hadley Rille
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 26° 7' 57" N, 3° 38' 0" E
- Conjunto de datos: Modelo digital del terreno y mosaico de imágenes de alta resolución derivado de pares estereoscópicos de las cámaras NAC a bordo de Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO).
- Resolución MDT: 2 metros/pixel
- Resolución Ortofoto: 1.4 metros/pixel





Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa

APOLO 16



Leyenda

-  Curvas de nivel
-  Módulo lunar

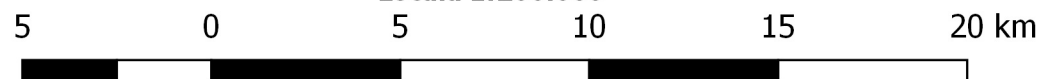
Información geodésica

- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union).
- Proyección: Moon Transverse Mercator (IAU:30165).
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 50 m

Información adicional

- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 16 (NASA)
- Zona lunar: Descartes.
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 8° 58' 24" S, 15° 30' 4" E
- Conjunto de datos: Modelo digital de elevaciones derivado de los datos procedentes del Lunar Orbiter Laser Altimeter a bordo de LRO (NASA) y de la cámara TC a bordo de SELENE (JAXA)
- Resolución MDE: 59 metros/pixel
- Incertidumbre vertical MDE: 4 metros.

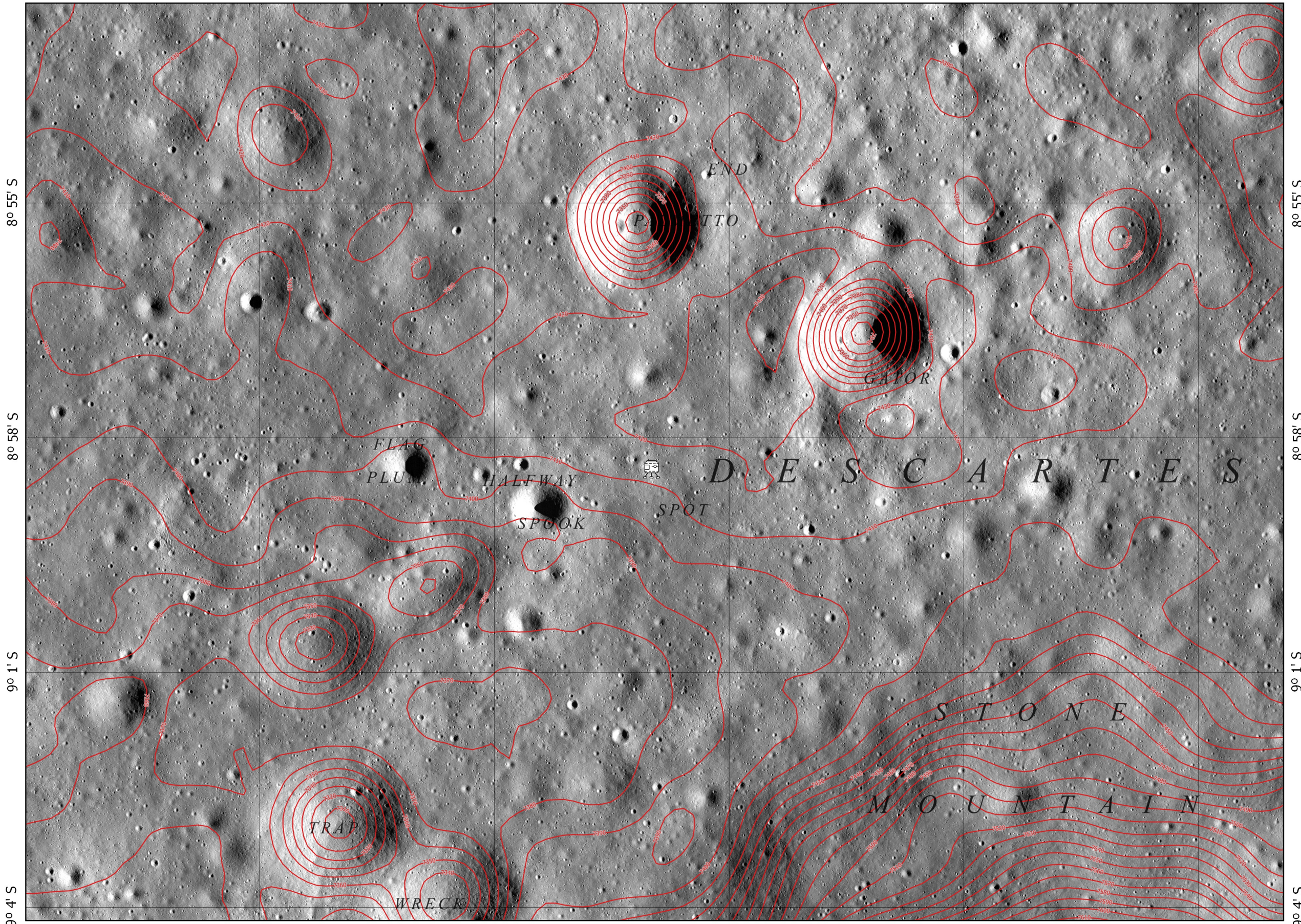
Escala 1:200.000



Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa

APOLO 16

15° 25' E 15° 28' E 15° 31' E 15° 34' E 15° 37' E



Leyenda

- Curvas de nivel
- Módulo lunar

Información geodésica

- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union, IAU).
- Proyección: Equirectangular
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 10 m

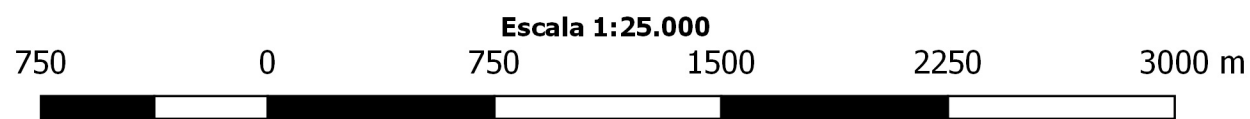
Información adicional

- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 16 (NASA)
- Zona lunar: Descartes.
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 8° 58' 24" S, 15° 30' 4" E
- Conjunto de datos: Modelo digital de elevaciones derivado de observaciones LOLA a bordo del LRO (NASA) coregistradas con observaciones de la cámara TC a bordo de SELENA (JAXA) y mosaico de imágenes de alta resolución derivados de pares estereoscópicos de las cámaras NAC a bordo de LRO.
- Resolución MDE: 59 m/pixel
- Resolución Mosaico: 0.9 m/pixel

8° 55' S
8° 58' S
9° 1' S
9° 4' S

8° 55' S
8° 58' S
9° 1' S
9° 4' S

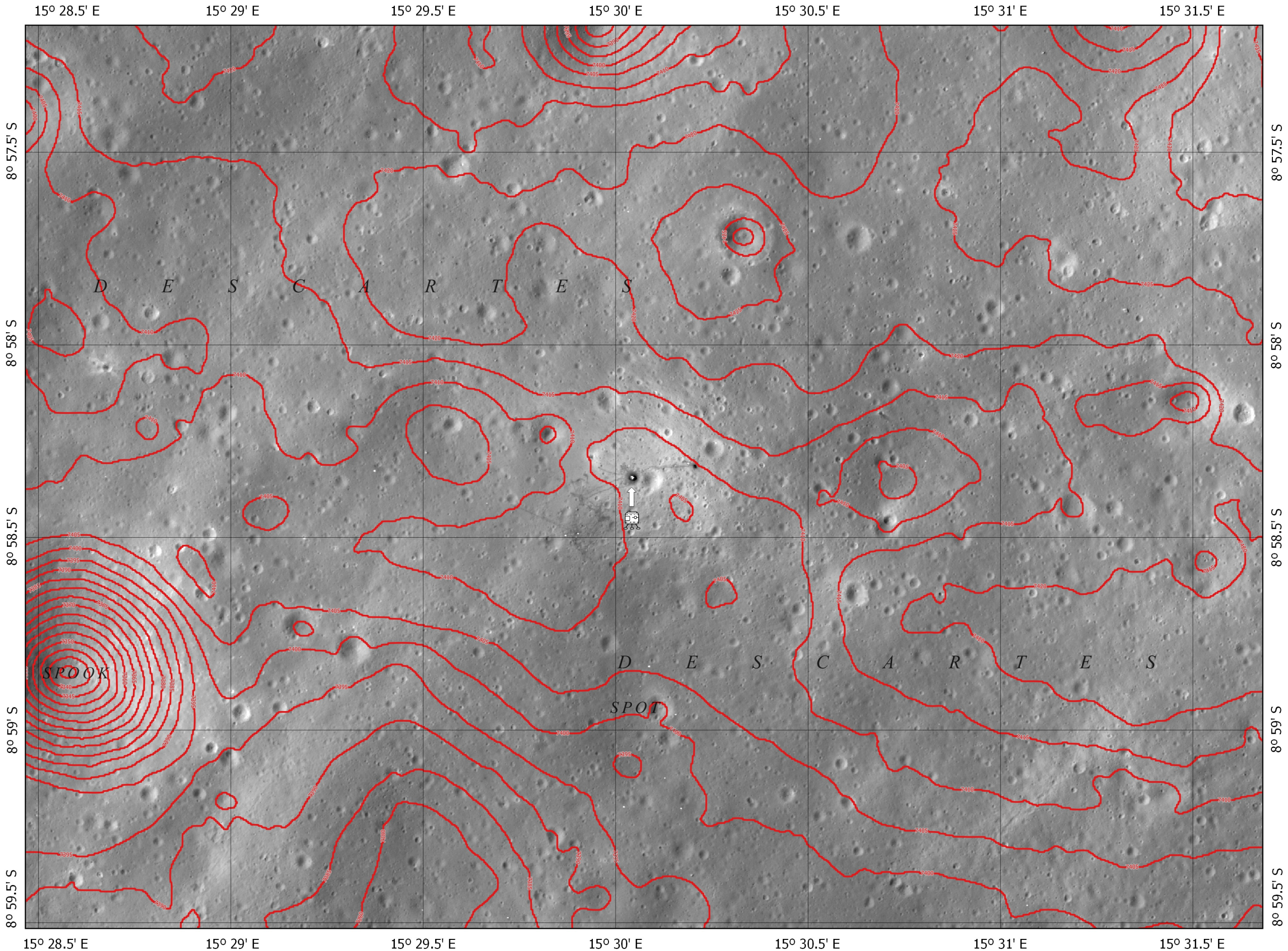
15° 25' E 15° 28' E 15° 31' E 15° 34' E 15° 37' E



Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa



APOLO 16



Leyenda

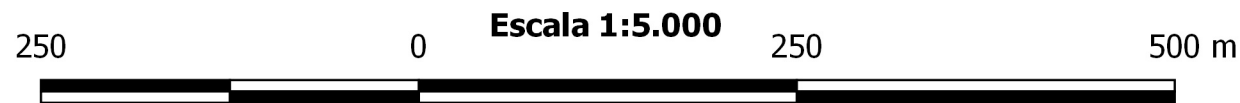
- Curvas de nivel
- Módulo lunar

Información geodésica

- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union, IAU).
- Proyección: Equirectangular
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 5 m

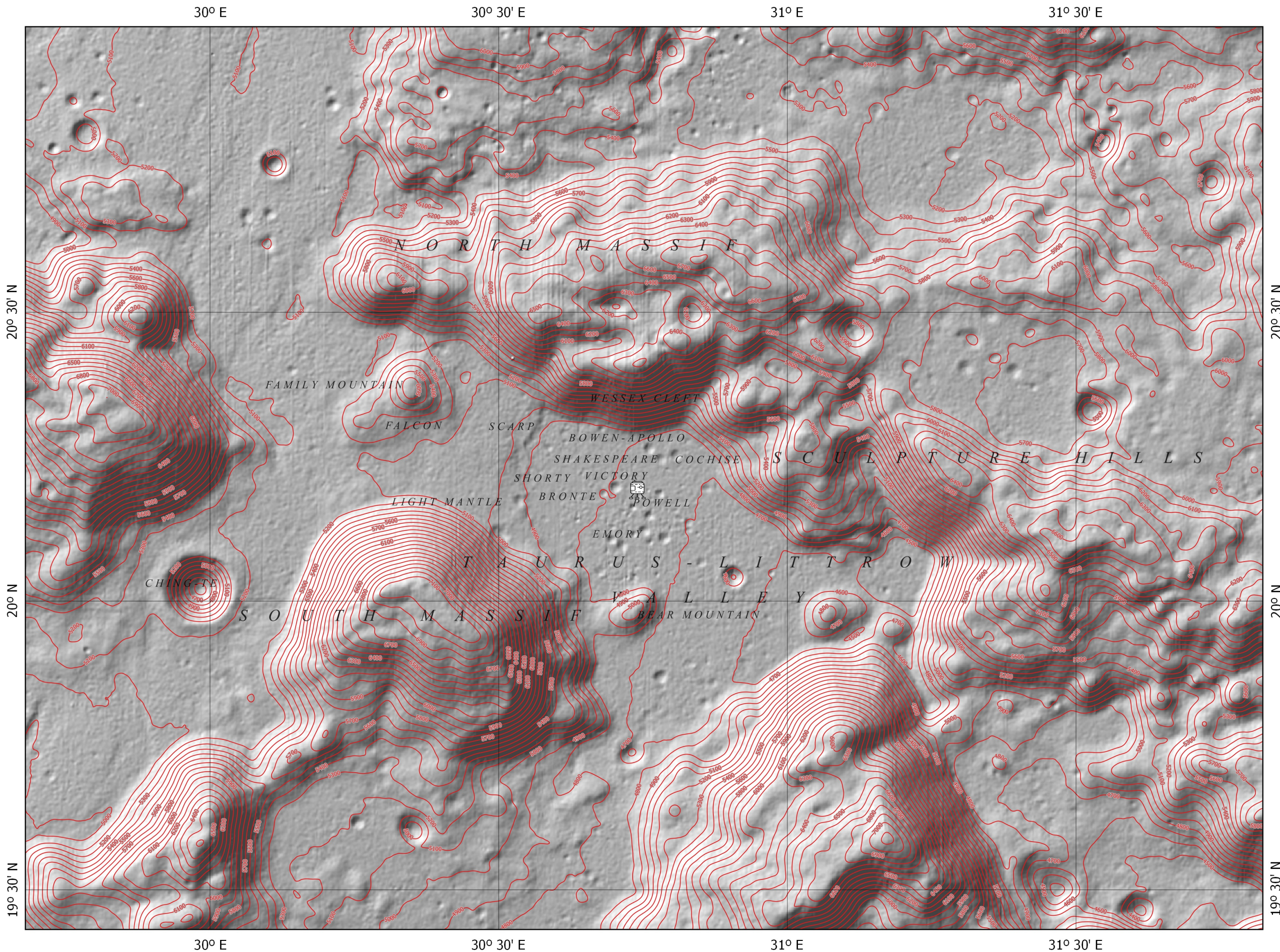
Información adicional

- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 16 (NASA)
- Zona lunar: Descartes.
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 8° 58' 24" S, 15° 30' 4" E
- Conjunto de datos: Modelo digital del terreno y ortofotografía de alta resolución derivados de pares estereoscópicos de las cámaras NAC (NACL y NACR) a bordo del Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO).
- Resolución MDT: 2 metros/pixel
- Resolución Ortofoto: 0.5 metros/pixel





Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa

APOLO 17



Leyenda

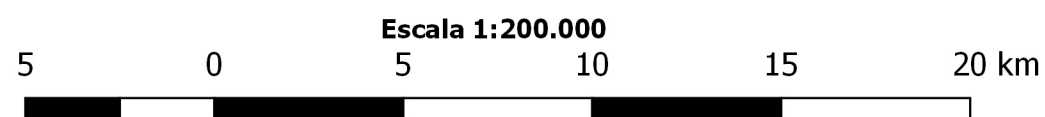
-  Curvas de nivel
-  Módulo lunar

Información geodésica

- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union).
- Proyección: Moon Transverse Mercator (IAU:30165).
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 100 m

Información adicional

- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 17 (NASA)
- Zona lunar: Taurus-Littrow.
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 20° 11' 28" N, 30° 46' 20" E
- Conjunto de datos: Modelo digital de elevaciones derivado de los datos procedentes del Lunar Orbiter Laser Altimeter a bordo de LRO (NASA) y de la cámara TC a bordo de SELENE (JAXA)
- Resolución MDE: 59 metros/pixel
- Incertidumbre vertical MDE: 4 metros.

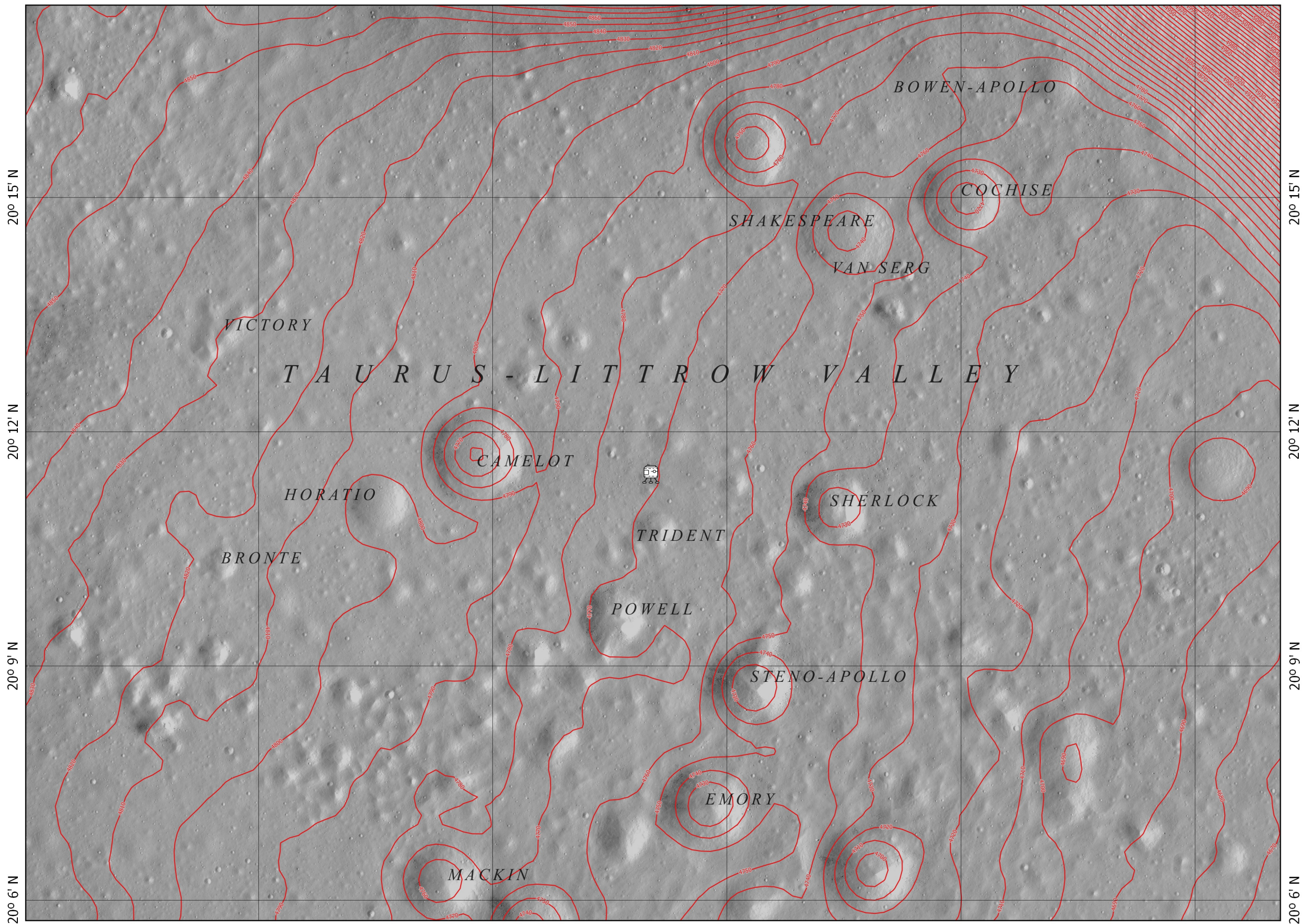


Escala 1:200.000

Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa

APOLO 17

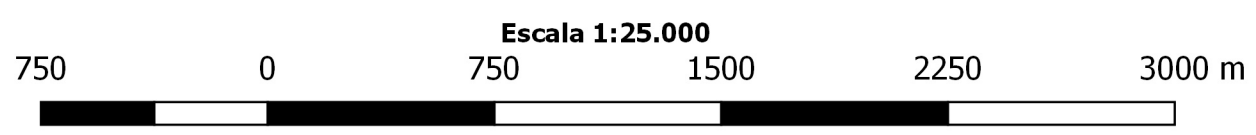
30° 41' E 30° 44' E 30° 47' E 30° 50' E 30° 53' E



Leyenda	
	Curvas de nivel
	Módulo lunar

Información geodésica	
- Esferoide:	Moon 2000 (International Astronomical Union, IAU).
- Proyección:	Equirectangular
- Semieje mayor:	1730000 metros.
- Semieje menor:	1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel:	10 m

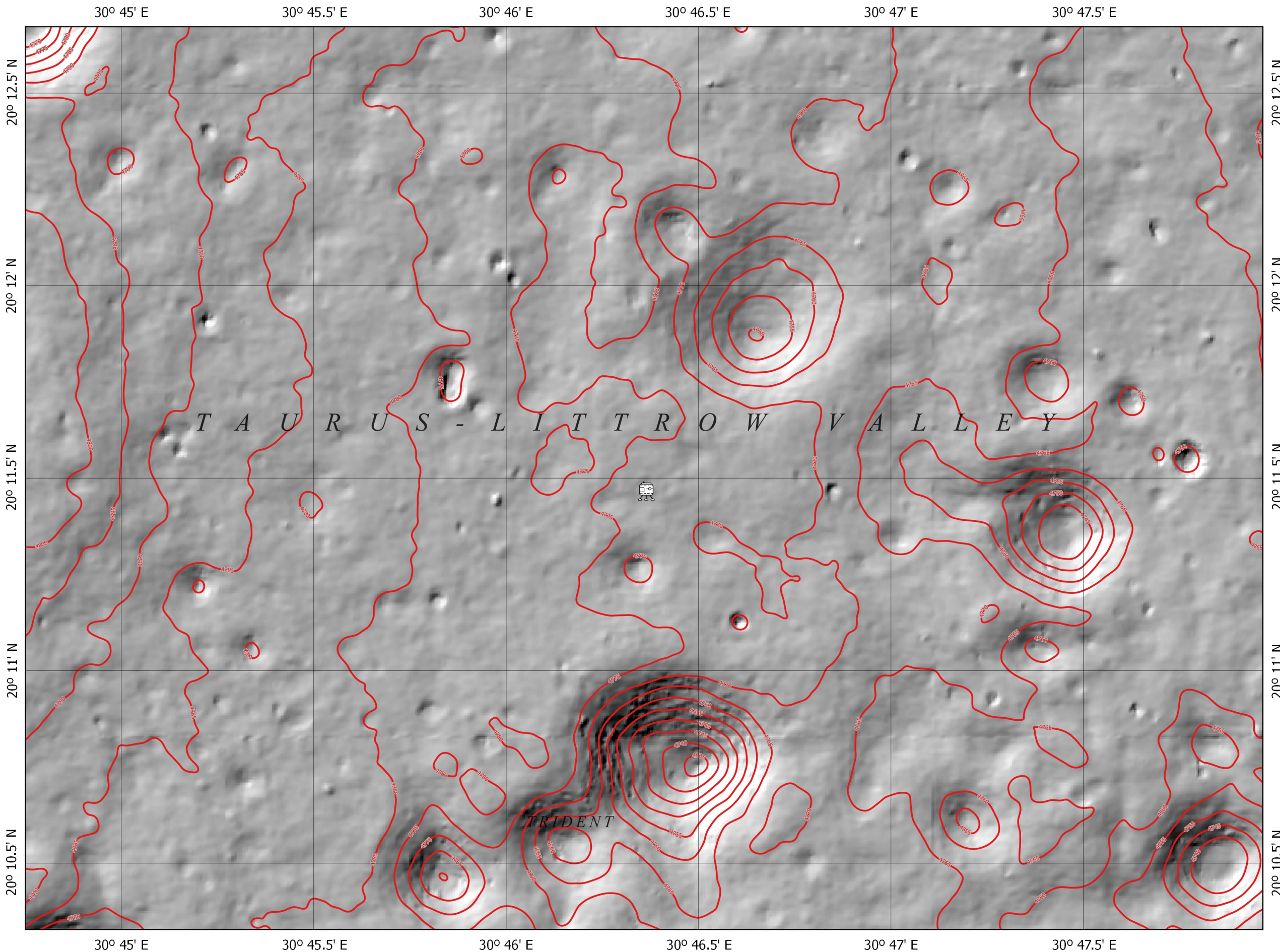
Información adicional	
- Producto:	mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión:	Apolo 17 (NASA)
- Zona lunar:	Taurus-Littrow.
- Coordenadas selenográficas del alunizaje:	20° 11' 28" N, 30° 46' 20" E
- Conjunto de datos:	Modelo digital de elevaciones derivado de observaciones LOLA a bordo del LRO (NASA) coregistradas con observaciones de la cámara TC a bordo de SELENA (JAXA) y mosaico de imágenes de alta resolución derivados de pares estereoscópicos de las cámaras NAC a bordo de LRO.
- Resolución MDE:	59 m/pixel
- Resolución Mosaico:	1.35 m/pixel



Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa



APOLO 17



Leyenda

- Curvas de nivel
- Módulo lunar

Información geodésica

- Esferoide: Moon 2000 (International Astronomical Union, IAU).
- Proyección: Equirectangular
- Semieje mayor: 1730000 metros.
- Semieje menor: 1730000 metros.
- Equidistancia curvas de nivel: 5 m

Información adicional

- Producto: mapa topográfico lunar resultado del trabajo fin de grado "Análisis de la topografía en las zonas de alunizaje de las misiones Apolo de la NASA".
- Misión: Apolo 17 (NASA)
- Zona lunar: Taurus-Littrow
- Coordenadas selenográficas del alunizaje: 20° 11' 28" N, 30° 46' 20" E
- Conjunto de datos: Sombreado del relieve obtenido a partir del Modelo digital del terreno de alta resolución derivados de pares estereoscópicos de las cámaras NAC (NACL y NACR) a bordo del Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO).
- Resolución MDT: 2 metros/píxel



Autor: Pablo César Velázquez de Castro y López
Tutor: José Luis García Balboa