

# **La Luna, un astro muy singular**

**Julio Solís García**



***Revista Digital de ACTA***  
**2023**

**Publicación patrocinada por**



**ACTA representa en CEDRO los intereses de los autores científico-técnicos y académicos. Ser socio de ACTA es gratuito.**

**Solicite su adhesión en [acta@acta.es](mailto:acta@acta.es)**

## **La Luna, un astro muy singular**

**© 2023, Julio Solís García**

**© 2023, **

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.

Se autorizan los enlaces a este artículo.

*ACTA no se hace responsable de las opiniones personales reflejadas en este artículo.*

## DESCUBRIENDO NUESTRO SATÉLITE

*"La cosa más maravillosa que se puede experimentar es el misterio... Es la fuente de todo arte y ciencia verdaderos". Albert Einstein (1879-1955)*

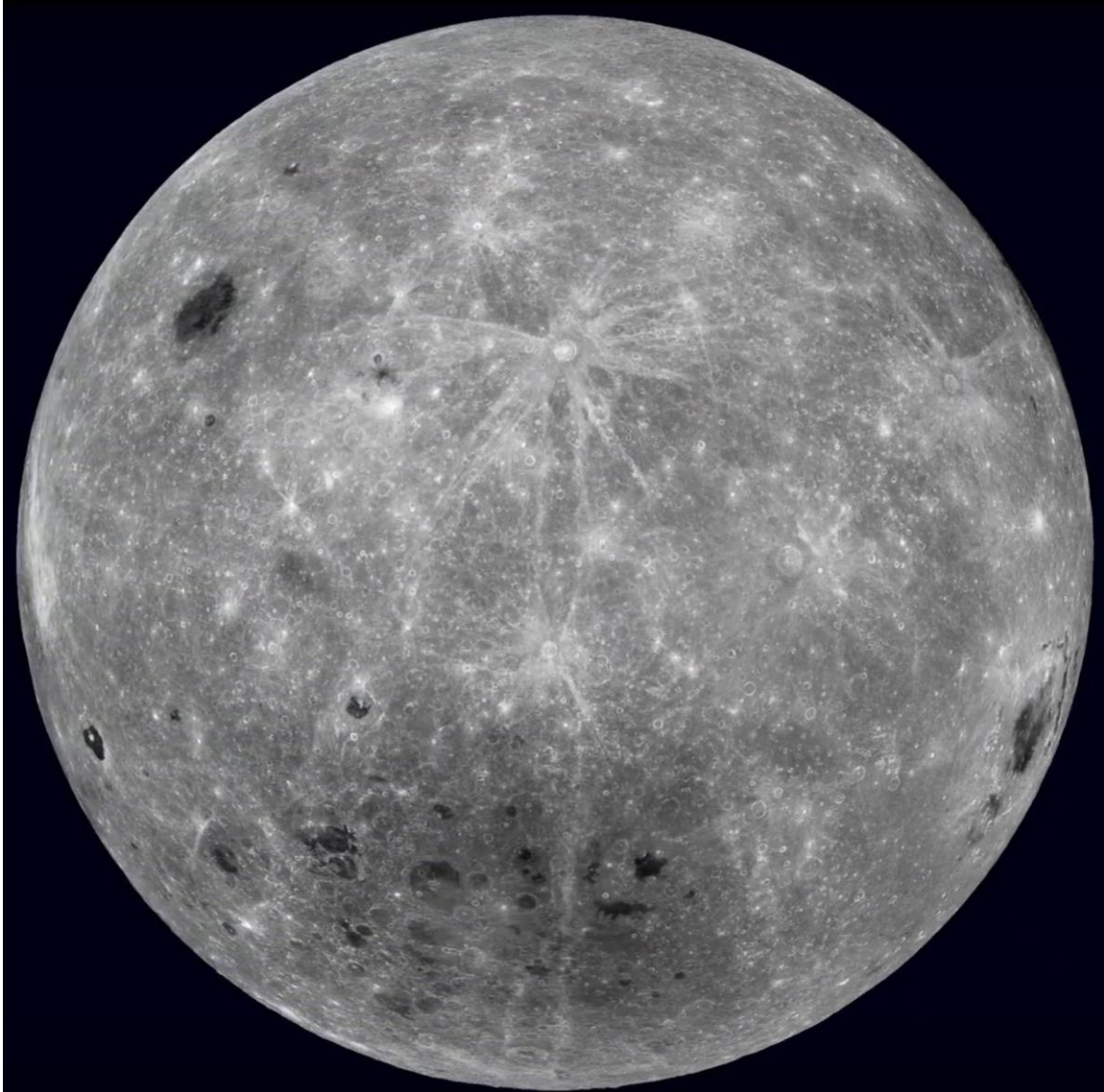
El cuerpo celeste que nos resulta más familiar y conocido, aparte del Sol, es la Luna. A cualquier persona que preguntemos por la Luna nos dirá que se ve en el cielo, que es muy brillante con una luz blanca intensa, que presenta zonas claras y oscuras (Figura 01), que presenta fases en un ciclo aproximado de 28 días y que cada día se puede localizar en un sitio diferente del cielo, siguiendo un movimiento hacia el este contrario al movimiento diario general hacia el oeste de toda la bóveda celeste.



*Figura 01: Fotografía de la Luna (cara visible) Imagen: NASA*

Con el desarrollo de los telescopios, y posteriormente con las imágenes enviadas por los vehículos espaciales que han visitado nuestro satélite, esas zonas claras y oscuras se mostraron en todo su esplendor, repletas de cráteres, fallas, montañas y cordilleras, planicies... catalogándose de una manera general en dos grandes grupos: las zonas más blancas denominadas '**tierras**' o continentes ('*Terrae*'), zonas abruptas con multitud de accidentes morfológicos que ocupan algo me-

nos del 70% de la superficie de la cara visible y casi la totalidad de la cara oculta. Las zonas más oscuras se denominan '**mares**' ('Mare' o 'Maria' en latín), por lo que creían que eran los primeros observadores lunares sin instrumentos ópticos de cierta calidad. Son grandes planicies sin apenas accidentes morfológicos. Los mares lunares, que ocupan algo más del 30% de la superficie de la cara visible, son casi inexistentes en la cara oculta, con  $\sim 1\%$  de su superficie (Figura 02).



*Figura 02: Fotografía de la Luna (cara oculta) Imagen: Orbitador de Reconocimiento Lunar (LRO) - NASA/Centro de Vuelo Espacial Goddard/Universidad Estatal de Arizona*

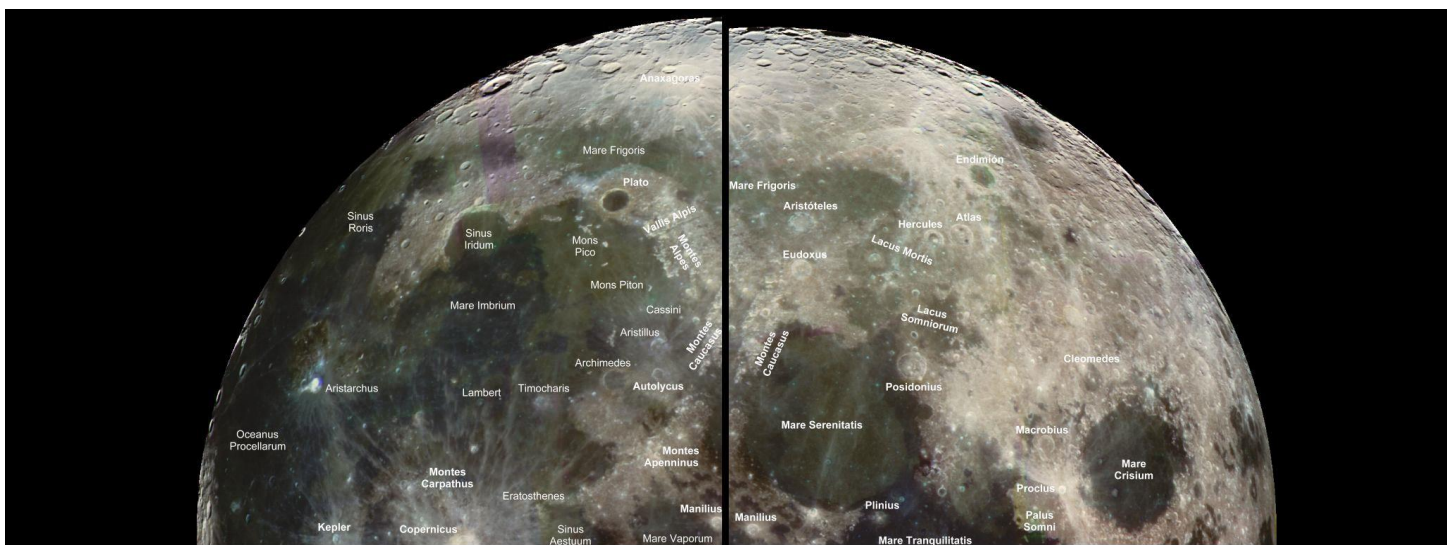


Analizando con más detalle esas zonas claras y oscuras (tierra y mares), se observan múltiples variedades del relieve, que se han denominado **'bahías'** ('*Sinus*'), **'lagos'** ('*Lacus*'), y **'lagunas o pantanos'** ('*Palus*'), para el caso de las zonas oscuras o '*mares*'.

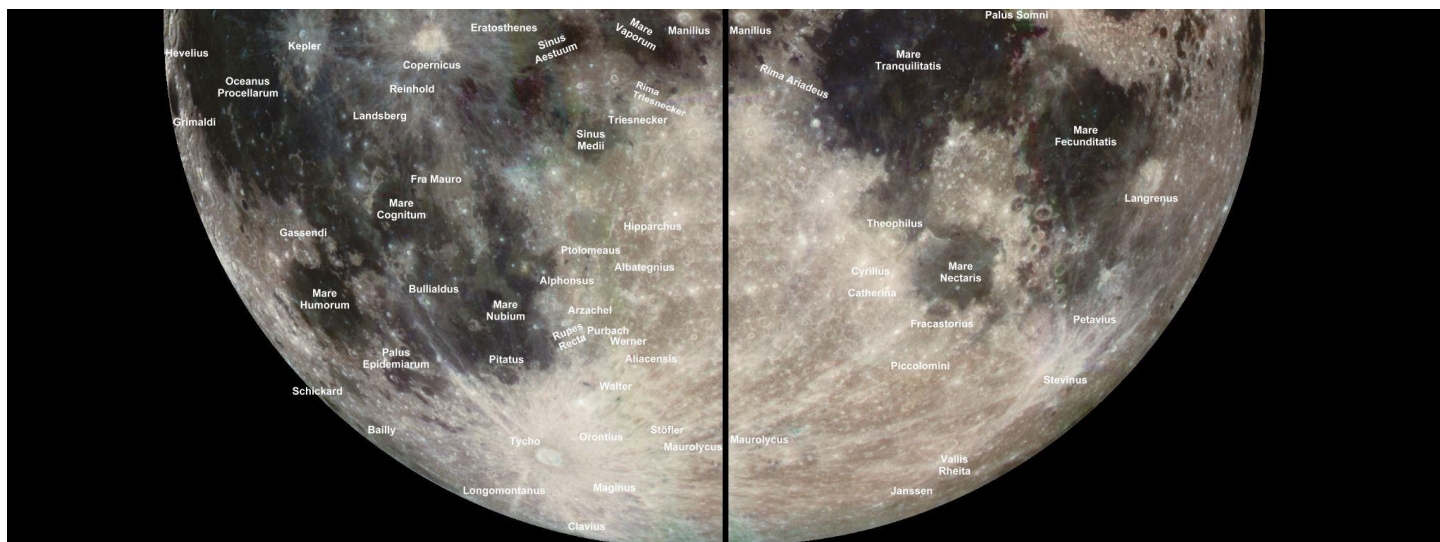
Para las zonas claras o '*tierras*', la variedad de accidentes es aún mayor, destacando las **'Grietas'** ('*Rimae*'), cortados escarpados estrechos (por ejemplo, '*Rima Hyginus*'); los **'Valles'** ('*Valles*'), entre los que se pueden mencionar el '*Valle Alpino*', el '*Valle Rheita*' o el '*Valle Achröteri*'; las **'Fallas'** ('*Rupes*'), especie de barrancos como el denominado el '*Muro Recto*' ('*Rupes Recta*'); las **'Cordilleras y Montañas'** ('*Montes/Mons*'), zonas montañosas de hasta 1000 km de longitud y 6500 m de altitud, como por ejemplo: '*Alpes*', '*Caucasus*', '*Apenninus*' y '*Carpathus*' para el caso de las *Cordilleras*, y '*Mons Piton*' o '*Mons Pico*' con más de 2000 m de altitud, entre los *Montes*; los **'Anillos Montañosos'** ('*Anulus Montuosus*'), con diámetros de entre 25 y 100 km, siendo algunos de los más significativos '*Alphonsus*' y '*Copernicus*'; las **'Planicies Amuralladas'** ('*Planitia Moenibus Circundata*'), que son grandes circos poligonales o circulares con diámetros que en ocasiones pueden superar los 100 km, siendo '*Clavius*' y '*Plato*' dos de los más destacados; los **'Circos'** ('*Circus*'), originados por erupciones volcánicas y sobre todo por impactos de meteoritos. '*Tycho*', que destaca por su sistema de radiaciones, es uno de los más conocidos y fácilmente visible desde la Tierra.

Por último, cabe mencionar los **'Cráteres'** ('*Crater*'), que son formaciones que salpican toda la Luna, sobre todo la cara oculta, y tienen un tamaño variable presentando algunos un pico central. Se les ha nombrado habitualmente con el nombre de eminentes astrónomos, matemáticos, filósofos, etc.. siendo algunos de los más destacables los cráteres '*Kepler*', '*Aristarchus*' o '*Proclus*', situados en el centro de sus respectivos sistemas radiales (Figuras 03 a 06). La Luna no presenta ningún tipo de actividad 'geológica' ni cráter de origen volcánico activo en el momento presente, salvo algún débil '*lunamoto*' ocasional, siendo la inmensa mayoría de los cráteres consecuencia de impactos meteoríticos, y también de asteroides o cometas en el pasado.

Cerca del polo sur lunar existe una gran depresión de 2500 km de diámetro y 12 km de profundidad, un gran cráter o 'cuenca de impacto' denominado **'Cuenca Aitken'**, y que según proponen los modelos más recientes, puede tener su origen en un fuerte impacto de algún gran cuerpo celeste, ocurrido algunos millones de años después de su formación, que provocó una lluvia de material, incluso de gran tamaño, durante decenas de millones de años tanto en la Tierra como en la Luna, generando nuevos cráteres y cuencas de impacto en la Luna, y originando ciertas asimetrías en el satélite.



Figuras 03 y 04: Cuadrantes NW y NE de la Luna con los nombres de algunos de los accidentes morfológicos más notables. Imagen: NASA/Rótulos: Julio Solís García



*Figuras 05 y 06: Cuadrantes SW y SE de la Luna con los nombres de algunos de los accidentes morfológicos más notables. Imagen: NASA/Rótulos: Julio Solís García*

A pesar de esa cercanía física y emocional, la superficie lunar es todo lo opuesto a la superficie de nuestro planeta... su cielo siempre es negro, de día y de noche, pues no tiene atmósfera significativa y solamente vestigios de ciertos gases. No hay viento, ni océanos, ni ríos que reconfiguren su superficie a través de la erosión, aunque sí existen fenómenos erosivos poco significativos causados por los impactos de meteoritos, micrometeoritos, viento solar, rayos cósmicos, y por las diferencias de temperatura en las zonas de sol/sombra que dilatan y contraen las rocas.

Tampoco hay estaciones en la Luna, ni nada que la proteja de los meteoritos, de la radiación solar y de los rayos cósmicos, salvo nuestro propio planeta, que tiene cierto efecto de apantallamiento en lo que a caída de meteoritos se refiere en el hemisferio que siempre 'nos mira', porque la Luna siempre nos muestra la misma cara debido a su rotación capturada, cuyo periodo coincide con el tiempo que tarda en orbitar alrededor de la Tierra, y por tanto siempre ha mantenido fuera de nuestra vista la 'cara oculta' hasta que logramos fotografiarla mediante vehículos espaciales lanzados al espacio.

Esa cara oculta es completamente diferente a la cara visible, repleta de 'mares', inexistentes en la parte expuesta al espacio exterior. De esta forma la Luna conserva un registro del pasado, cuyas huellas se mantienen en el tiempo prácticamente intactas permitiendo estudiar inalterados los efectos de su convulso origen, y de paso, del propio origen de la Tierra.

Nuestra Luna, la luna del planeta Tierra, es un objeto muy especial. A lo largo de este trabajo se describirán sus singularidades desde un punto de vista astronómico y astrofísico, pero su papel en el desarrollo de nuestro planeta, de la vida y de la propia Humanidad, ha sido determinante para que las cosas sean como las conocemos hoy.

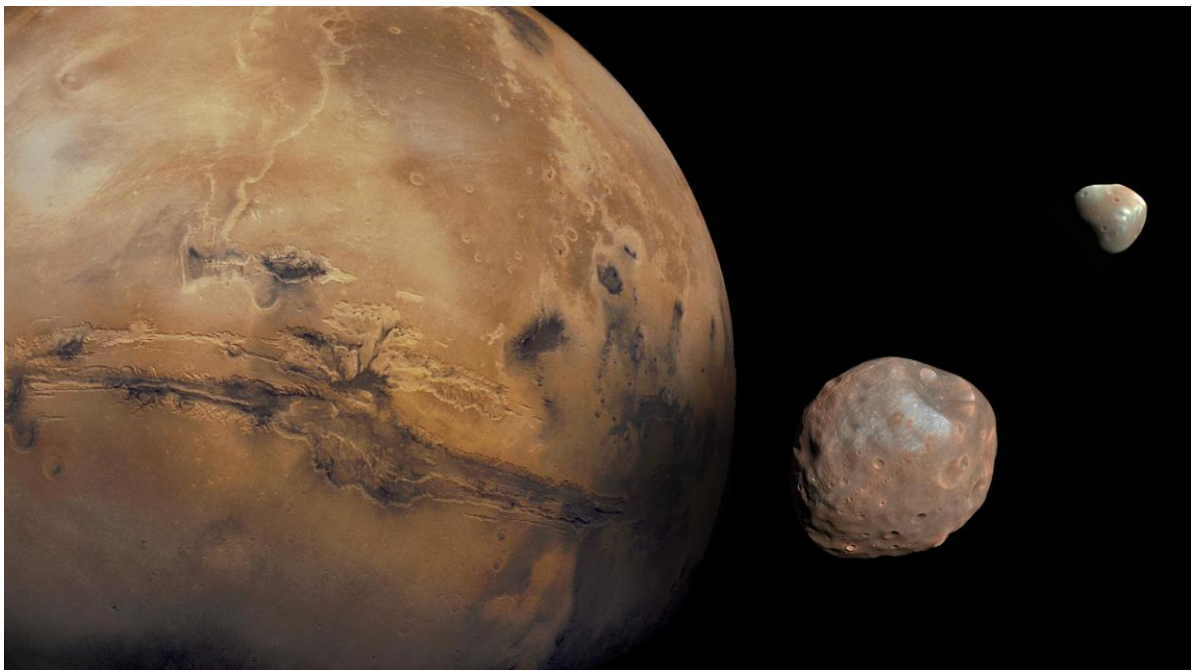
## ORIGEN Y ESTRUCTURA

*" Me gusta pensar que la luna está ahí, incluso si no estoy mirando". Albert Einstein (1879-1955)*

Existen diversas hipótesis acerca del momento y de la manera en la que se formó La Luna, unas son más aceptadas que otras entre la comunidad científica, pero todas tienen dificultades para explicar algunos detalles que siguen sin resolverse y que en alguna medida las cuestionan. Sí parece haber consenso, en cambio, en que la Luna se formó durante los primeros 500 millones de años posteriores al nacimiento del Sistema Solar y de la Tierra primitiva.

Uno de los modelos teóricos que explicaría la formación de la Luna es el denominado de 'fisión', en el que una Tierra primitiva se fragmentaría debido a su alta velocidad de rotación dando lugar a lo que hoy es la Luna e incluso al planeta Marte. Esta hipótesis no explicaría de forma convincente las órbitas de ninguno de los dos, por lo que ha sido prácticamente descartada.

Una segunda hipótesis, más aceptada que la anterior y que encaja bien con los modelos más aceptados de formación planetaria, propone que la Luna y la Tierra se formaron a la vez en la misma nube de gas y polvo como dos objetos separados. Pero rápidamente se encuentran ciertas características lunares que no puede explicarse bajo este modelo, una de las más notables es la diferente composición de sus núcleos, que en el caso de la Tierra cuenta con una importante presencia de hierro mientras que en el de la Luna es mucho menor. Dentro de este grupo de hipótesis destaca la que podríamos llamar de 'múltiples impactos', que sugieren la formación de la Luna como el resultado de acumulación de desechos y restos de numerosos impactos, dando lugar a lo que es actualmente, quedando en órbita alrededor de la Tierra. Estas hipótesis de múltiples impactos no explicarían la singularidad del caso terrestre respecto a sus vecinos Venus y Marte, que no han desarrollado la formación de satélites de forma similar. Venus no tiene satélites a pesar de ser un planeta 'gemelo' de la Tierra, y Marte tiene dos pequeños satélites irregulares que parecen ser más bien asteroides capturados del cercano Cinturón de Asteroides que se encuentra entre las órbitas de Júpiter y Marte (Figura 07).



*Figura 07: Marte y sus dos satélites, Fobos y Deimos (de izquierda a derecha). Imagen: NASA*



Se ha propuesto también un modelo denominado de 'captura', que supone una formación de la Luna y de la Tierra en lugares y momentos distintos, y que tras un encuentro fortuito la Luna resultó capturada por la Tierra. Esta hipótesis tampoco explica los parámetros orbitales de nuestro satélite, extremadamente difíciles de cumplir en un proceso de captura, ni el bajo contenido de hierro en el interior lunar.

Tras los análisis del material lunar recogido de la Luna, sobre todo en las misiones 'APOLO', y la generación de modelos desarrollados en los nuevos supercomputadores, la hipótesis que genera más consenso actualmente entre los científicos, es la de un gran impacto catastrófico entre la primitiva Tierra y otro gran objeto de tamaño planetario denominado '*Theia*' (Figura 08), que giraba alrededor del Sol en una órbita cercana a la de la Tierra.



*Figura 08: Recreación artística del choque cataclísmico entre el planeta Theia y la Tierra  
Imagen: NASA/JPL-Caltech*

Este gigantesco impacto originó que una Tierra en formación se recompusiera fundiéndose de nuevo tras su incipiente enfriamiento desde su formación original, quedando ambos astros ligados en un solo objeto magmático denominado '**sinestia**', hasta que fueron paulatinamente recuperando la configuración actual de dos cuerpos esféricos separados (Figuras 09 y 10).



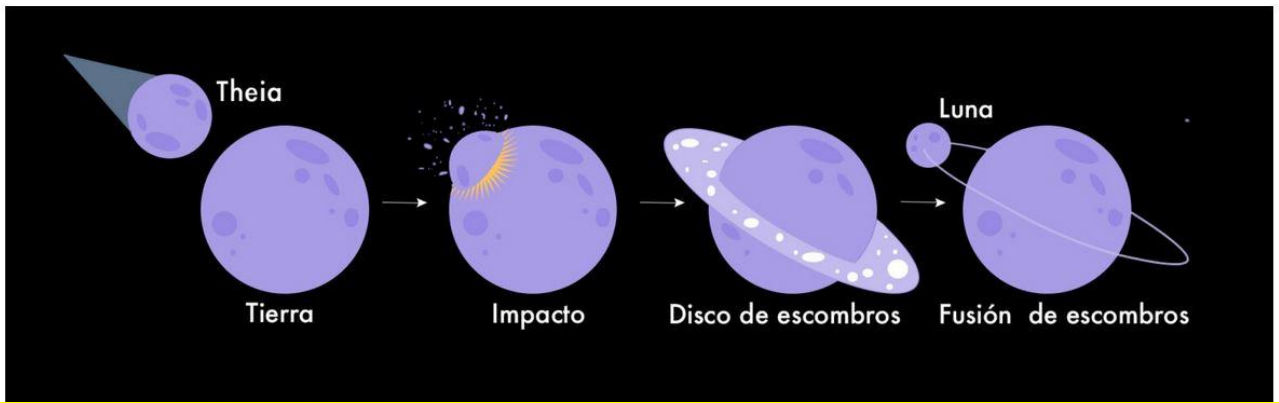


Figura 09: En el modelo clásico de la colisión la luna es formada a partir del material arrancado de la Tierra mezclados con los sobrantes del impactor. Imagen tomada de [www.wgbh.org](http://www.wgbh.org)

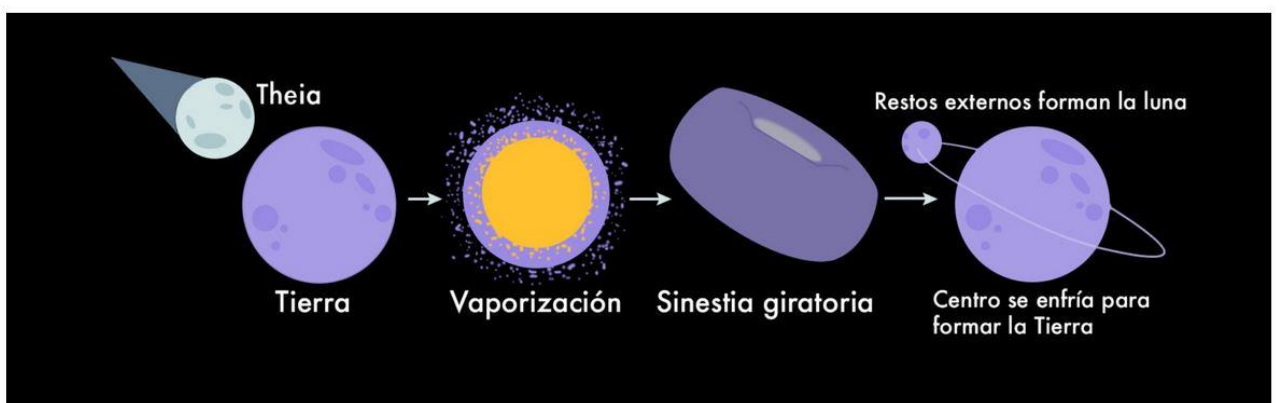
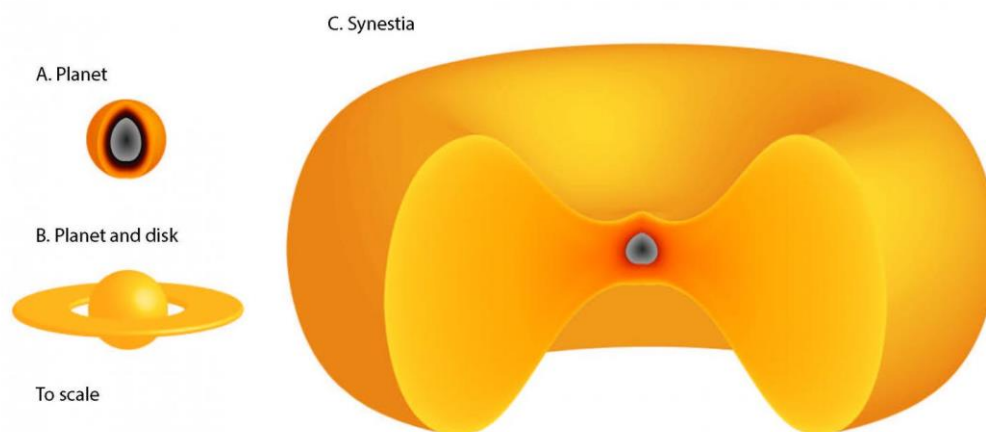


Figura 10: En el modelo de formación de una sinestia uno o más cuerpos pueden chocar con la Tierra primitiva, generando que material vaporizado forme un híbrido entre un planeta y un disco, una suerte de toroide. La mezcla de materiales hace que el satélite formado tenga la misma composición que el planeta. Imagen tomada de [www.wgbh.org](http://www.wgbh.org)

Las composiciones químicas y mineralógicas de la Tierra y de la Luna muestran diferencias tan notables que debilitan las hipótesis de un origen común en la misma nube protoplanetaria, sobre todo teniendo en cuenta el tamaño relativamente similar de los dos cuerpos. Las últimas investigaciones al respecto se han centrado en las condiciones físico-químicas reinantes durante la formación de las rocas lunares y las encontradas en amplias zonas de la corteza terrestre, que refuerzan la hipótesis del choque entre 'Theia' y la Tierra primitiva (Figura 11).

El análisis isotópico del cloro y de otros elementos químicos presentes en las rocas superficiales lunares, ha determinado que en la Luna las rocas contienen una mayor concentración de isótopos 'pesados', poco hierro y baja presencia de elementos volátiles, al contrario que en minerales terrestres de similares características, lo que encaja bien con la suposición de que la Tierra atrajo hacia ella mayor cantidad de elementos y compuestos volátiles tras el cataclísmico encuentro planetario.



*Figura 11: Planeta, Planeta con anillos y Sinestia, los tres con la misma masa  
Imagen: Simon Lock -Harvard-. Vía Universidad de California en Davis*

Los más recientes estudios sobre los grandes impactos catastróficos durante la formación planetaria, concluyen que lo que se forma tras semejantes cataclismos cósmicos no son desechos, escombros, y discos de materiales más o menos grandes alrededor del protoplaneta impactado, sino una '*sinestia*', que es algo parecido a una gigantesca rosquilla (similar a un donut pero sin agujero central) de material rocoso vaporizado, una especie de magma a medio camino entre sólido y líquido, un cuerpo fundido resultado del colosal impacto, que ni es un anillo ni un cuerpo esférico, y que con el tiempo se enfría y se solidifica en los cuerpos planetarios definitivos, como son la Tierra y la Luna actuales.

Existe una teoría más relacionada con el origen de la Luna, algo impactante que a simple vista parecería 'conspiranoica' o directamente perteneciente a la ciencia ficción. Alexander Shcherbakov y Mikhail Vasin, científicos soviéticos de la Academia Soviética de Ciencias, propusieron a finales de la década de los años 60 del pasado siglo una teoría acerca del origen de la Luna, que explicaba de alguna manera la larguísima serie de características singulares y rarezas de nuestro satélite, y que ninguna de las otras hipótesis más ortodoxas, conseguían explicar. La hipótesis soviética propone que la luna es en realidad un satélite artificial de la Tierra colocado en órbita por seres inteligentes desconocidos. La Luna podría ser una especie de 'arca de Noé' o una nave espacial fallida que tuvo que dejarse estacionada.

Esta hipótesis tan extravagante sobre el origen de la Luna no lo es tanto a la luz de la enorme cantidad de peculiaridades lunares, y que las investigaciones presentes y futuras se encargarán de desmentir o confirmar, porque a día de hoy lo cierto es que nuestra querida Luna es un objeto único y singular, raro como pocos en todo el Sistema Solar.

La idea, prácticamente desechada en el ámbito científico, de que la Luna es una nave espacial extraterrestre abandonada en órbita alrededor de la Tierra, recobró algo de actualidad, en el año 2017, con el descubrimiento del objeto interestelar '*Oumuamua*', que atravesó el Sistema Solar en una órbita marcadamente hiperbólica y que parecía provenir de alguna zona del cielo próxima a la estrella '*Vega*' (*Alfa Lyrae*). Este objeto, descubierto por los telescopios situados en el Observatorio de Haleakala en la isla de Maui (Hawái), se nombró '*Oumuamua*' que en hawaiano significa "mensajero de lejos que llega primero", alargado y rojizo, con forma de 'palo', con 400 m de largo y unos 40 m de ancho, llamó rápidamente la atención de los astrofísicos por su comportamiento y características, llegando algunos a postular que se trataba de una nave espacial extra-

terrestre, o al menos un objeto artificial. En todo caso, parece que tanto la Luna como Oumuamua resultarían ideales como naves interestelares, protegiendo su interior de radiaciones, temperaturas extremas, impactos.... en un espacio interestelar tan inmenso como hostil (Figura 12).



*Figura 12: Representación artística del objeto interestelar Oumuamua  
Imagen: ESO/M. Kornmesser*

Continuando con las características que hacen de la Luna un astro tan especial, y antes de analizar lo que conocemos de su estructura interna, salta a la vista su gran tamaño en relación con el planeta Tierra. Es el único 'planeta doble' del Sistema Solar, no encontraremos nada parecido entre todos los planetas de nuestro sistema planetario a excepción del planeta enano Plutón y su gran luna 'Caronte', que también presentan unos tamaños relativamente similares entre ellos.

La Luna tiene una densidad media de  $3,344 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , algo más de la mitad de la terrestre ( $5,52 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) que es la mayor entre todos planetas del Sistema Solar, y una gravedad superficial de  $1,623 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , seis veces menor que la que soportamos en la superficie terrestre, una persona de 90 kg que visitara nuestro satélite, en la Luna pesaría 15 kg!

Superficie desnuda, cielo siempre negro y silencio absoluto, sin atmósfera apreciable, expuesta directamente al espacio, a la radiación solar, a los rayos cósmicos, a los meteoritos y micrometeoritos, y sin campo magnético. Sin agua líquida y con temperaturas de  $92^\circ\text{C}$  en las zonas iluminadas por el Sol y de  $-169^\circ\text{C}$  en las zonas nocturnas o en sombra, la Luna no muestra unas condiciones mínimas capaces de soportar la vida. La Luna se aleja  $\sim 4 \text{ m/siglo}$  de la Tierra, lo que hace suponer que hace más de 3000 millones de años, las mareas eran mucho más violentas y energéticas, y los efectos gravitacionales de la Luna muchísimo más notorios, pudiendo afectar a la aparición y evolución de la vida en edades tempranas. Se estima que hace unos 900 millones de años, el día terrestre tenía una duración de unas 19 horas y el año unos 464 días.

La información astronómica oficial actualizada sobre la luna puede consultarse en el Anuario del Observatorio Astronómico Nacional - 2023 (IGN):

### 3.6. Datos lunares

#### Elementos medios de la órbita para 2023

Longitud media	$L_0 = 13^\circ 46' 9729 + 13^\circ 17' 639645 d$
Anomalía media	$M_0 = 74^\circ 38' 2784 + 13^\circ 06' 499305 d$
Longitud del perigeo medio	$\varpi_0 = 299^\circ 08' 6941 + 0^\circ 11' 140339 d$
Long. media del nodo ascendente	$\Omega_0 = 40^\circ 25' 9441 - 0^\circ 05' 295373 d$
Elongación media referida al Sol	$D_0 = 94^\circ 05' 7816 + 12^\circ 19' 074909 d$

(En estas fórmulas  $d$  es el día del año, en la escala de TU.)

#### Coordenadas eclípticas verdaderas

Desarrollos aproximados de longitud eclíptica, latitud eclíptica y paralaje:

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= L_0 + 377' \sin M_0 + 76' \sin(2 D_0 - M_0) + 40' \sin(2 D_0) + 13' \sin(2 M_0) \\ \beta_0 &= 309' \sin(\lambda_0 - \Omega_0) \\ \pi_0 &= 57' + 3' \cos M_0\end{aligned}$$

A partir de la paralaje ecuatorial  $\pi_0$  se pueden calcular:

$$\text{semidiámetro} = 0,2725 \pi_0, \quad \text{distancia geocéntrica} = \frac{1}{\sin \pi_0} R_\oplus$$

#### Libraciones:

Desplazamiento máximo: en longitud:  $7^\circ 9$  (periodo=mес anomalístico)  
 en latitud:  $6^\circ 8$  (periodo=mес draconítico)  
 diurna:  $1^\circ 0$

Desplazamiento medio:

libración óptica en longitud:	$6^\circ 15$
libración óptica en latitud:	$6^\circ 69$
libración física en longitud:	$0^\circ 025$
libración física en latitud:	$0^\circ 04$

#### Datos físicos

		en unidades terrestres
Radio ecuatorial	$R_0 = 1738,14 \text{ km}$	$0,2725 R_\oplus$
Radio medio	$1737,42 \text{ km}$	
Superficie	$3,788 \cdot 10^7 \text{ km}^2$	$0,0743$
Volumen	$2,199 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$	$0,0203$
Masa	$M_0 = 7,3460 \cdot 10^{22} \text{ kg}$	$0,0123 M_\oplus$
Densidad media	$3,344 \text{ g cm}^{-3}$	$0,6063$
Constante gravitatoria	$G M_0 = 4,902800 \cdot 10^{12} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$	$0,0123000371$
Gravedad superficial	$1,623 \text{ m s}^{-2}$	$0,1652$
Velocidad de escape	$2,375 \text{ km s}^{-1}$	$0,2123$
Momento de inercia	$0,394 M_0 R_0^2$	
Momento gravitatorio $J_2$	$202,7 \cdot 10^{-6}$	

#### Datos fotométricos

Albedo	$0,12$
Magnitud aparente en su oposición media:	$V = -12,74$ $B = -11,82$
Magnitud visual $V(1,0)$ a 1 ua	$+0,21$
Temperaturas medias:	
noche	$104 \text{ K} = -169^\circ \text{C}$
día	$365 \text{ K} = 92^\circ \text{C}$
ondas radio	$\sim 200 \text{ K}$
equivalente	$395 \text{ K} = 122^\circ \text{C}$
del cuerpo negro	$274,5 \text{ K}$

#### Distancia

Distancia media	$384400 \text{ km}$	$60,268 R_\oplus$
	en tiempo luz	$1^\circ 28' 222$
Distancias extremas:	mínima	$356375 \text{ km} = 55,874 R_\oplus$
	máxima	$406720 \text{ km} = 63,768 R_\oplus$
Semidiámetro medio:	geocéntrico	$15' 32'' 6$
	topocéntrico (cénit)	$15' 48'' 3$
Paralaje ecuatorial horizontal media		$3422',608 = 57' 02'',608$

#### Otros datos orbitales

Excentricidad	$e_0 = 0,054900489$	
Inclinación orbital media:		
	respecto de la eclíptica	$5^\circ 14' 5396$
	respecto del ecuador lunar	$6^\circ 41'$
	respecto del ecuador terrestre	$18^\circ 28 \text{ a } 28^\circ 58$
Inclinación del ecuador lunar medio		
	respecto de la eclíptica:	$1^\circ 54' 242 = 1^\circ 32' 32'',7$
Movimiento sidéreo medio diario		$13',176358$
Intervalo medio entre tránsitos		
	o pasos por el meridiano	$24^h 51^m 28^s$
Velocidad orbital media		$1,023 \text{ km s}^{-1} = 3683 \text{ km h}^{-1}$
Aumento de la distancia a la Tierra		$\sim 4 \text{ m/siglo}$

#### Traslación y rotación

Duración media de los meses:

mes sinódico (luna nueva)	$29^d 53' 05884$	$29^d 12^h 44^m 02^s 8$
mes sidéreo (estrella a estrella)	$27^d 32' 16616$	$27^d 07^h 43^m 11^s 6$
mes anomalístico (perigeo)	$27^d 55' 45501$	$27^d 13^h 18^m 33^s 1$
mes trópico (equinoccio)	$27^d 32' 15823$	$27^d 07^h 43^m 04^s 7$
mes draconítico (nodo)	$27^d 21' 22220$	$27^d 05^h 05^m 35^s 8$

Algunos periodos de interés:

periodo de rotación del perigeo  $3232 \text{ días}$   
 periodo de retrogradación del nodo  $6798 \text{ días} = 18,61 \text{ años trópicos}$   
 año eclíptico (pasos sucesivos del Sol por el nodo lunar):  $346^d 62' 005$   
 periodo Saros  $= 223 \text{ meses sinódicos} = 19 \text{ años eclípticos}$   
 $= 6585,32 \text{ días} = 18,03001 \text{ años trópicos}$

#### Distancia, semidiámetro y paralaje horizontal de la Luna

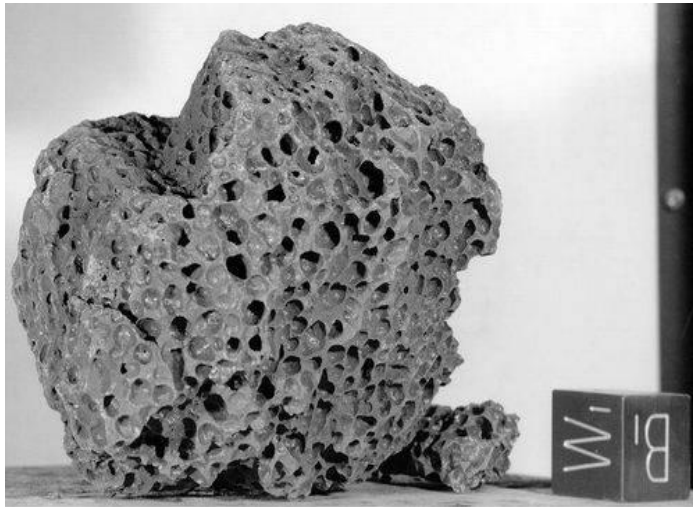
La distancia al centro de la Tierra  $r_0$ , el semidiámetro  $s_0$  y la paralaje ecuatorial horizontal  $\pi_0$  son parámetros relacionados entre sí. La conversión de uno a otro puede hacerse interpolando con los valores que figuran en la tabla siguiente o bien mediante fórmulas:

$$\begin{aligned}r_0(\text{en km}) &= 6378,140 r_0(\text{en } R_\oplus) \\ s_0 &= 0,272493 \pi_0, \quad \sin \pi_0 = \frac{1}{r_0(\text{en } R_\oplus)} \\ \pi_0(^{\circ}) &\simeq \frac{57,3}{r_0(\text{en } R_\oplus)}, \quad \pi_0(') \simeq \frac{3438}{r_0(\text{en } R_\oplus)}\end{aligned}$$



La superficie de la Luna está cubierta por '*regolito*', una capa de varios metros de espesor que cubre la corteza lunar, y que es una mezcla de polvo, rocas desmenuzadas, escombros y granos sólidos muy pequeños, resultado de impactos y de la erosión provocada por los cambios bruscos de temperatura. Su textura es similar a la de la arena de zonas desérticas terrestres y tiene un color gris.

Prácticamente todo el conocimiento que se tiene hoy en día de la mineralogía lunar se ha obtenido de los análisis de los más de 380 kg de material recogido por las diferentes misiones Apolo (EE.UU.), y por las muestras que han podido traer a nuestros laboratorios las sondas automáticas soviéticas del Programa 'Luna' (Figuras 13 y 14).



*Figura 13: Anortosita ferrosa (feldespato plagioclásica) recogida por el Apolo 16 (NASA) del cráter Descartes*



*Figura 14: Roca de basalto-Olivino traída desde la Luna (Rima Hadley) por la misión Apolo 15, formada hace 3.300 millones de años*

De acuerdo con la hipótesis más sólida acerca de la formación de la Luna, la de un gran impacto entre el cuerpo planetario Theia y la Tierra original, que dio lugar a la Luna y Tierra actuales hace más de 4000 millones de años, el exterior lunar quedó formado por una gran capa de magma de unos 500 km de grosor. Esa capa de roca fundida se fue enfriando y cristalizando con el tiempo, quedando en la parte más externa una capa de minerales poco densos (anortositas) de unos 40 km de espesor, flotando sobre otra capa de minerales más densos ricos en hierro y magnesio (ultramáficos). El enfriamiento, cristalización, y diferenciación por las diferentes densidades de las rocas de ese océano de roca fundida, configuró la Corteza y el Manto lunares.

Por encima de la Corteza, en la superficie de la Luna, se encuentran trazas de gases como el Ar, Ne, Na, He, K e H, que resultaría algo exagerado denominar atmósfera, pues tienen en conjunto una densidad casi tan baja como la del espacio vacío, que además desaparece prácticamente por completo durante la noche lunar. En la corteza lunar, desde la superficie hasta unas profundidades de entre ~50 y ~100 km encontramos dos áreas bien diferenciadas, por un lado las situadas en las 'tierras altas' hasta una profundidad de unos 10 km, con presencia de rocas ígneas ricas en hierro y magnesio (minerales máficos) cerca de la superficie, cubriendo otra capa más profunda de anortositas hasta el Manto, y por otro en los 'mares', mayoritariamente compuestos por basaltos en la parte más exterior y por anortositas en el interior hasta el Manto (Figura 15).

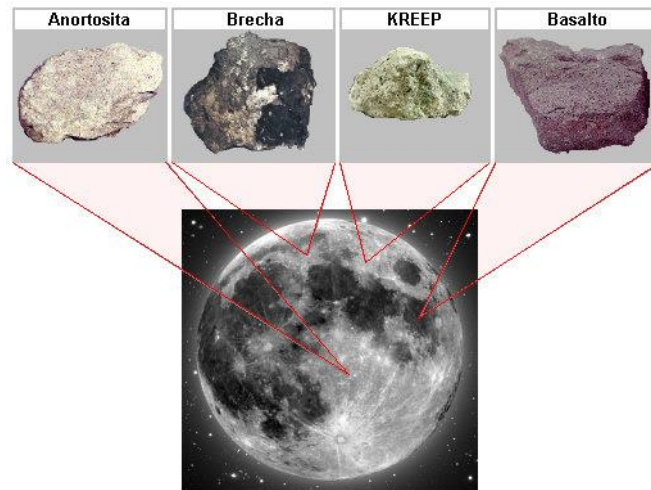


Figura 15: Distribución de las rocas lunares sobre la superficie. Imágenes: NASA, Ilustraciones adicionales: Luis María Benitez. Licencia: dominio público

La corteza es sensiblemente más delgada en la cara visible que en la cara oculta, debido a que siempre presenta el mismo hemisferio hacia la Tierra (rotación capturada o síncrona), esta circunstancia hace que el manto lunar se haya visto desplazado en dirección a nuestro planeta, que tira fuertemente del mismo, quedando desplazado con respecto al centro geométrico lunar. La consecuencia es la disminución del espesor de la corteza en el lado más próximo a la Tierra, que alcanza su valor mínimo bajo los mares lunares, doblando prácticamente su espesor en la cara oculta, plagada de cráteres y sin mares.

Entre la corteza y el núcleo se encuentra el manto, de unos 1300 km de espesor, compuesto por gabro en su parte más cercana a la corteza, y por peridotita más hacia el interior, donde se encuentra una capa de roca semifundida que lo separa del núcleo. Se cree que ese estado semifundido se debe a las fuerzas de marea generadas por la Tierra.

El núcleo lunar, de ~340 km de espesor y rico en hierro, se encuentra en estado sólido, aunque la parte exterior que lo separa del manto, de ~90 km de espesor, se encuentra parcialmente fundida (Figura 16).

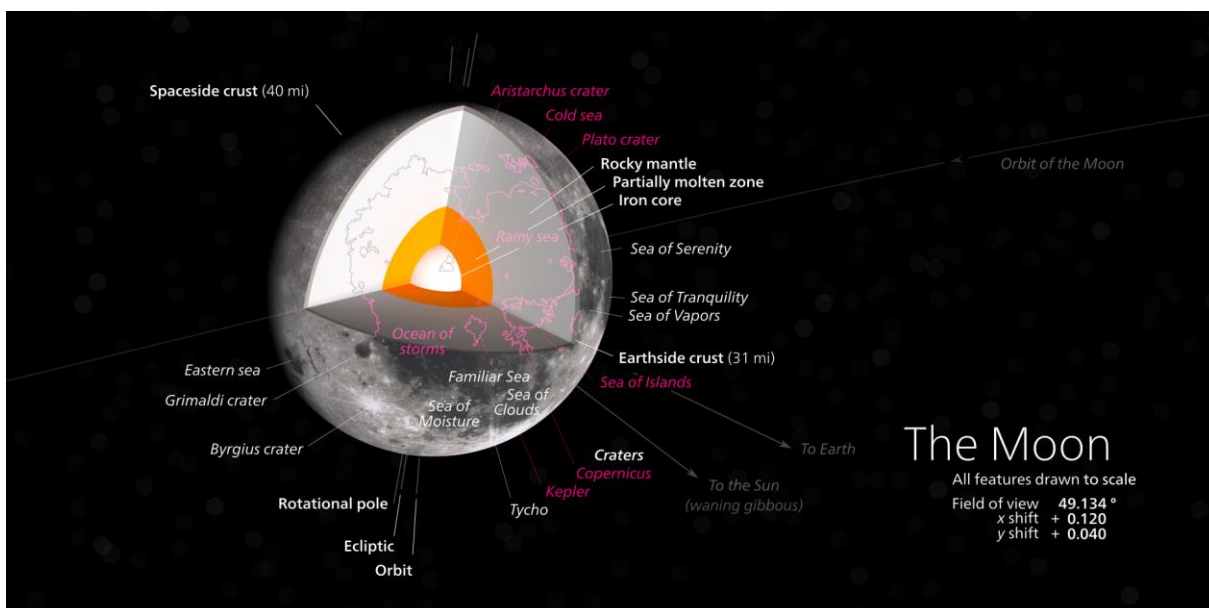


Figura 16: Estructura interna de la Luna -Wikimedia Commons-

La composición química general de las rocas lunares es similar a la del manto silicatado terrestre, pobre en elementos volátiles (H, He, N, C, P) y rica en elementos refractarios (O, Si, Al, Ca, Ti, Mg, Fe). Las plagioclasas, piroxenos, olivinos, óxidos de hierro y titanio, son los minerales más abundantes, aunque en las rocas superficiales existe mayor presencia de basaltos, anortositas, noritas y troctolitas. Los impactos de grandes meteoritos en edades tempranas y medias, removieron grandes zonas de la corteza y del manto, dando lugar a brechas de impacto y cuencas multianillo, generando extensas coladas de lavas basálticas procedentes del manto que al enfriarse han dado lugar 'mares lunares' actuales. En el manto son frecuentes los gabros y las peridotitas. Cabe destacar las acumulaciones de hielo de  $H_2O$  en el fondo de algunos cráteres cercanos a las zonas polares y en las zonas ocultas permanentemente a la luz solar.

## ECLIPSES

*" La luna asombra mi vida como si fuera una ilusión"*  
Juan Ramón Jiménez (1881-1958)

Las peculiaridades lunares no terminan con lo visto hasta ahora, en lo relativo a los eclipses en nuestro sistema Tierra-Luna no encontraremos nada parecido en todo el Sistema Solar. El tamaño aparente de la Luna en el cielo coincide casi completamente con el del Sol, y la Luna se mueve alrededor de la Tierra en un plano prácticamente coincidente con eclíptica ( $5^\circ$ ) en lugar de hacerlo en el plano ecuatorial, como cabría esperar y ocurre en la mayoría de satélites no capturados de otros planetas. La eclíptica es el camino aparente que sigue el Sol en el cielo (y todos los planetas con algunas desviaciones mínimas, salvo Mercurio cuyo plano orbital se aparta de la eclíptica en  $7^\circ$ ). Ambas circunstancias son ciertamente muy singulares.

La Luna gira sobre sí misma en algo más de 27 días, aunque debido al movimiento de la Tierra alrededor del Sol, a la que acompaña la Luna, su rotación (periodo sinódico), de 'luna nueva' a

'luna nueva', es de algo más de 29 días (Figura 17). Los eclipses en el sistema Tierra-Luna solamente se producen cuando El Sol, La Tierra y La Luna están alineados, es decir, cuando la 'Luna llena' o la 'luna nueva' cruzan la eclíptica (Figura 18).

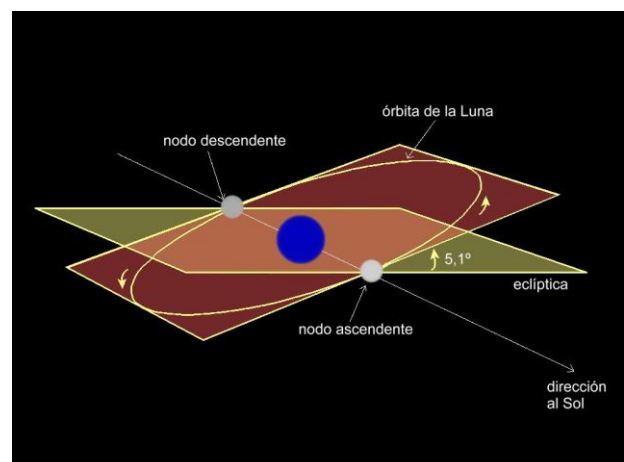
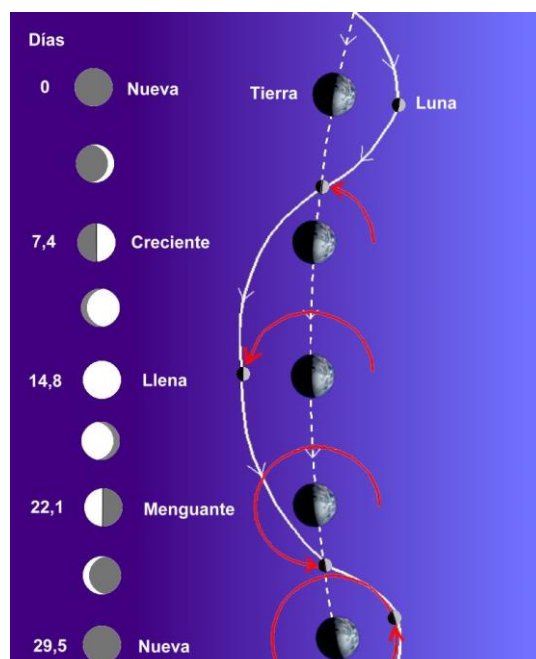


Figura 17: Rotación y traslación lunar. Fases.  
Imagen: Julio Solís García

Figura 18: Plano orbital de la Luna y la eclíptica

Imagen: Julio Solís García

Los eclipses de Luna se producen cuando nuestro satélite se introduce en el cono de sombra que proyecta la Tierra hacia el espacio en dirección opuesta al Sol. Como el astro rey no es una fuente puntual de luz, sino que lo vemos como un disco de un diámetro de 32' de arco en nuestro cielo, el cono de sombra proyectado por nuestro planeta presenta dos zonas diferenciadas, la umbra (sombra) y la penumbra; en la primera la luz del Sol queda totalmente bloqueada y en la segunda la luz solar queda oculta parcialmente. Por tanto, existen tres tipos de eclipses de Luna: total, parcial y penumbral (Figura 19).

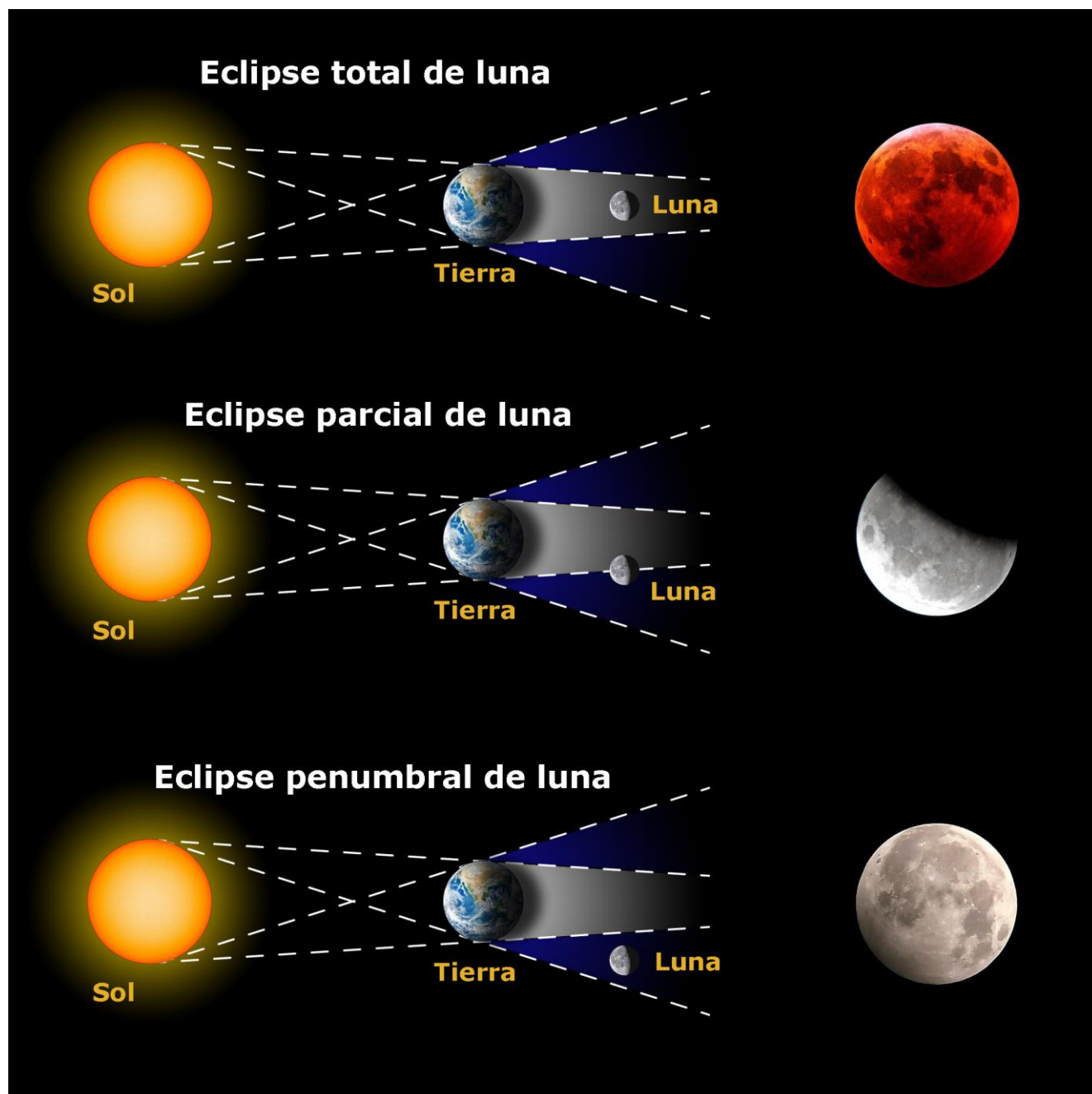


Figura 19: Eclipses de Luna: total, parcial y penumbral, según pase el satélite por la zona de penumbra o sombra (umbra). Imagen: Instituto Geográfico Catastral - Observatorio Astronómico Nacional



Podremos decir que estamos observando un eclipse total de Luna cuando ésta, en fase de luna llena, se sitúe completamente en la zona de sombra (umbra) de la Tierra (Figuras 20, 21, 22 y 23).



*Figura 20: Eclipse total Luna desde Málaga.  
Lunes 16 de mayo de 2022, 4:07:52 hop  
Imagen: Julio Solís García*



*Figura 21: Eclipse total Luna desde Málaga. Lunes 16 de mayo de 2022, 5:06:32 hop. Imagen: Julio Solís García*



*Figura 22: Eclipse total Luna desde Málaga. Lunes 16 de mayo de 2022, 4:33:02 hop  
Imagen: Julio Solís García*

Durante los eclipses totales de Luna, el satélite adquiere un color rojizo característico debido a la dispersión de la luz refractada por la atmósfera de la Tierra.

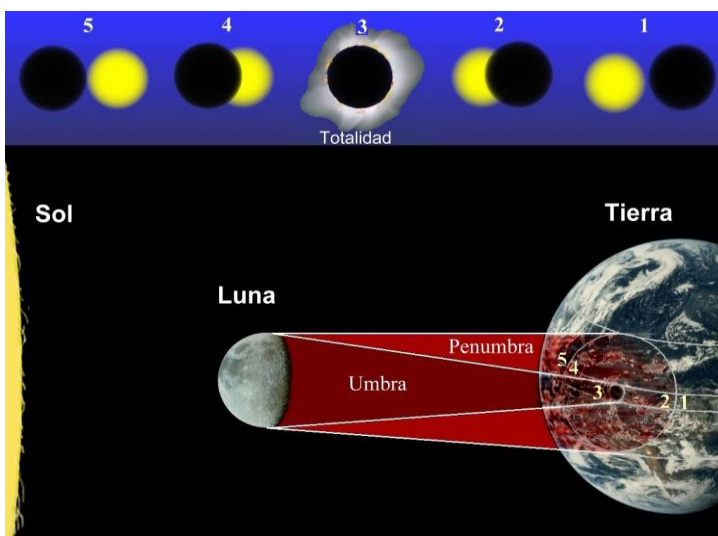
## *La Luna, un astro muy singular*

Los eclipses lunares pueden ser vistos desde cualquier parte de la Tierra en la que sea de noche y tienen una duración de varias horas.



*Figura 23: Eclipse total Luna desde Málaga. Lunes 16 de mayo de 2022, 5:00:38 hop  
Imagen: Julio Solís García*

Cuando es la Luna la que proyecta su cono de sombra sobre la superficie de la Tierra, se produce un eclipse de Sol, que será visible en la zona que va recorriendo dicha sombra (Figuras 24 y 25).



*Figura 24: Eclipse de Sol. Imagen: Julio Solís García*



*Figura 25: Eclipse total de Sol  
Imagen: Wikimedia Commons*

Los eclipses solares pueden ser vistos solo desde una parte relativamente pequeña de la Tierra y duran unos pocos minutos, dándose siempre en fase de 'luna nueva'.

Podemos clasificar los eclipses solares en tres categorías: totales, anulares y parciales. Estaremos viendo un eclipse total cuando la Luna cubra enteramente el disco del Sol; sin embargo, otra persona situada a centenares o miles de km más al norte o más al sur que el primero, verá cómo la Luna cubre solamente una parte del Sol, de manera que para él el eclipse será parcial. Cuando la Luna no llega a cubrir enteramente al Sol, quedando la sombra (umbra) fuera del disco terrestre, el eclipse será parcial para todos los observadores.

Los eclipses anulares se producen cuando el disco lunar no llega a cubrir el disco del Sol, aunque sus centros estén bien alineados, observándose un anillo brillante rodeando el disco lunar. La causa de este fenómeno es que debido a la excentricidad de la órbita lunar (0,054900489) la Luna se encuentra en ese momento más lejos y por tanto su diámetro angular es menor que el del Sol; su disco se ve más pequeño y no consigue tapar completamente al astro rey (Figura 26).

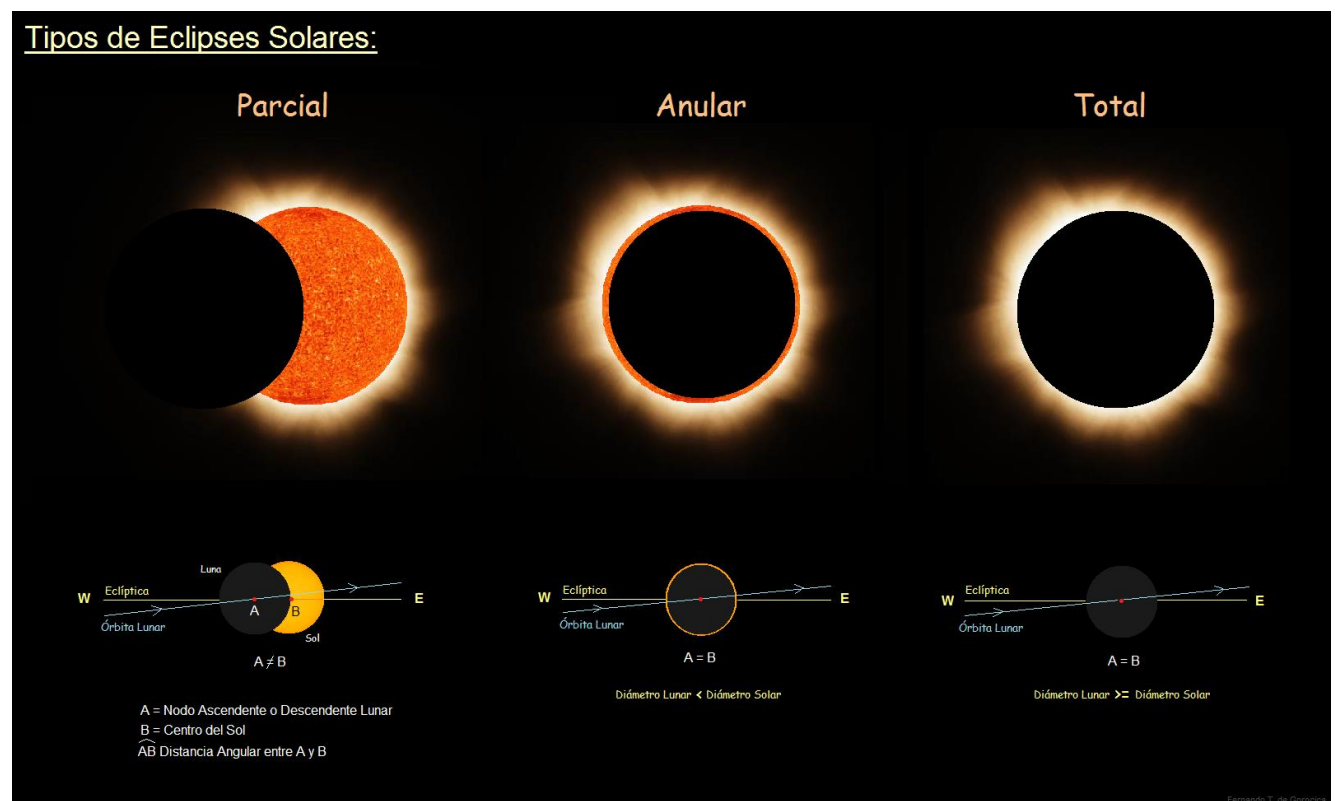


Figura 26: Tipos de eclipses solares, parcial, anular y total.  
Imagen: Fernando de Gorocica - Licencia: Creative Commons (Wikimedia)

Los eclipses son relativamente frecuentes, aunque los solares son mucho más difíciles de ver, dada la estrecha franja en la que son observables y el poco tiempo que duran para una misma ubicación. En un año suelen producirse entre 4 y 7 eclipses, incluyendo los de Sol y los de Luna. Es normal que los eclipses de Sol y de Luna se sucedan media lunación después de que se produzca el primero, por lo que cada año hay al menos dos eclipses solares y dos lunares. En este siglo se producirán 223 eclipses solares (68 totales, 79 anulares, y 76 parciales) y 230 eclipses lunares (85 totales, 58 parciales y 87 penumbrales).

## LA LUNA Y LOS VUELOS ESPACIALES

*"Mientras estoy aquí en Hadley, rodeado por las maravillas de lo desconocido, trato de comprender que existe una verdad fundamental en nuestra naturaleza: El hombre debe explorar, y esto es explorar en su grado más alto"*

*David Scott, astronauta del Apolo XV, 15 de agosto de 1971*

Concluida la II Guerra Mundial en el año 1945, los hasta entonces socios combatientes contra la Alemania nazi de Adolf Hitler y la Italia fascista de Benito Mussolini, empezaron a mirarse de reojo y a contraponer los modelos capitalistas de EE.UU. y socialista-marxista de la U.R.S.S.

Los norteamericanos crearon una alianza militar (OTAN) en 1949 para frenar la creciente influencia soviética en Europa, respondiendo los soviéticos con la constitución del Pacto de Varsovia en 1955, dando origen a la denominada 'Guerra Fría' que duraría hasta la disolución de la Unión Soviética en 1991.

En ese contexto competitivo entre los dos bloques, se puso en marcha una carrera para demostrar las capacidades de cada uno, sus competencias, sus habilidades, su poder económico, su potencial militar, y su nivel de desarrollo en Ciencia y Tecnología.

Para muchos esa carrera espacial, que dio lugar a la denominada 'Era del Espacio', comenzó cuando el Secretario de Prensa de la Casa Blanca anunció el 29 de julio de 1955 el propósito del presidente Eisenhower de lanzar un satélite artificial (Proyecto Vanguard) antes de terminar el Año Geofísico Internacional, que tendría lugar entre los meses de julio de 1957 y diciembre de 1958.

A pesar de esa intensa campaña propagandística norteamericana los soviéticos se adelantaron, poniendo en órbita el satélite 'Sputnik I' en octubre de 1957. La U.R.S.S. siguió encabezando la carrera espacial durante los diez años posteriores, alcanzando hitos muy importantes para la astronáutica, como la puesta en órbita del primer ser vivo (perrita Laika) en el 'Sputnik II', que consiguió sobrevivir al lanzamiento y mantenerse con vida varias horas después, o el lanzamiento del primer ser humano al espacio de forma exitosa. Yuri Gagarin (Yuri Alekséyevich Gagarin, 1934-1968) fue la primera persona en visitar el espacio a bordo de la nave espacial 'Vostok I', completando una vuelta alrededor de la Tierra, regresando sano y salvo el 12 de abril de 1961 y declarando: '*La Tierra es azul*' y '*Pobladores del mundo, salvaguardemos esta belleza, no la destruimos*'.

Esta superioridad soviética en la carrera espacial determinó que unas semanas después del espectacular éxito de Yuri Gagarin, el presidente norteamericano John F. Kennedy anunciara su propósito de enviar un hombre a la Luna antes de acabar la década. Tal era el estado de ánimo decaído y resignado en EE.UU. que durante una entrevista al Dr. Wernher von Braun, experto ingeniero aeroespacial de origen alemán, le preguntaron por lo que encontrarían en la Luna los futuros astronautas, a lo que contestó: ¡irusos!

La carrera espacial entre EE.UU. y la U.R.S.S. continuó con los lanzamientos frenéticos por ambas partes de más y más vehículos espaciales, con fines militares, científicos, experimentales, meteorológicos..., dejando muchos en órbita terrestre y enviando otros a explorar nuestros vecinos próximos Venus y Marte. Entre el personal científico norteamericano de todos estos proyectos se encontraban científicos alemanes que trabajaron para la industria militar del Tercer Reich, y que tras el término de la II Guerra Mundial emigraron o fueron captados por EE.UU. Caso emblemático



co es el del Dr. Wernher von Braun, reputado experto mundial en el desarrollo de cohetes, ingeniero aeroespacial que desarrolló las destructivas y devastadoras 'V2' alemanas que tanto daño causaron al final de la guerra, sobre todo en Londres y Amberes. Este reputado científico participó en el desarrollo de cohetes para el ejército de EE.UU. y posteriormente fue designado director del Centro de Vuelo Espacial Marshall integrado ya en la NASA, desde el que desarrolló el famoso cohete 'Saturno V' que acabaría llevando a los norteamericanos a la Luna.

En lo que a la exploración de la Luna se refiere, durante la década 1960-1970 los soviéticos optaron por proyectos robotizados, menos costosos y complejos que los tripulados, capaces de desplazarse (rover lunar), extraer muestras para traerlas a la Tierra y cartografiar la superficie de nuestro satélite. Para los norteamericanos, tal y como anunció John F. Kennedy en 1961, era una necesidad imperiosa lograr un hito en la carrera espacial equivalente o superior a los realizados por la U.R.S.S., como conseguir llevar un ser humano a la Luna por primera vez en la Historia, por encima del coste y de los riesgos. El programa Apolo se inició a mediados de 1960 y terminó en 1975 con el lanzamiento de la última nave Apolo para la misión 'Apolo-Soyuz', poniendo fin a la carrera espacial entre EE.UU. y la U.R.S.S., aunque el programa lunar finalizó a finales de 1972 con el Apolo 17. Posteriormente se abrió una etapa de cooperación internacional en cuanto a misiones espaciales, con aportaciones de muy diversos países y agencias espaciales.

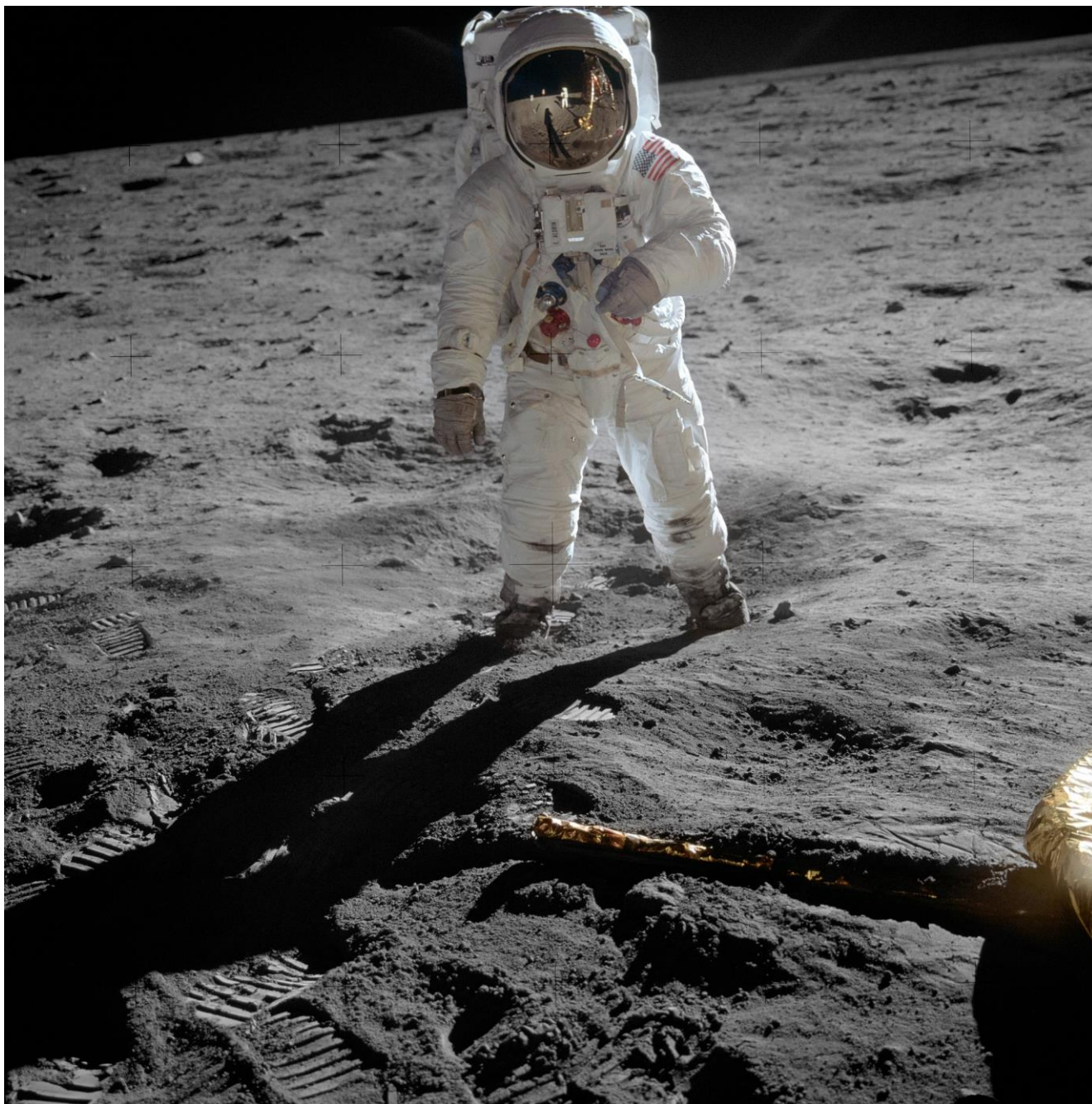
El primer lanzamiento (no tripulado) fue el 'AS-201' el día 26 de febrero de 1966, al que sucedieron dos más ese mismo año, no tripulados y con éxito. En febrero de 1967 se lanzó el Apolo 1 ('AS-204'), primero con tripulación de tres astronautas y con un final trágico al fallecer la tripulación completa durante un incendio en tierra al no poder abrir la escotilla a tiempo. Se continuó con lanzamientos no tripulados en los siguientes meses hasta el 11 de octubre de 1968, fecha en la que se lanzó el Apolo 7 con tres tripulantes que completaron con éxito esta misión.

El Apolo 8 fue el primer vuelo tripulado hasta la Luna. Un cohete Saturno V lanzó a Frank Borman, James A. Lovell y William Anders al espacio en dirección a la Luna el día 21 de diciembre de 1968, siendo los primeros hombres en ver nuestro planeta de forma completa, la cara oculta de la Luna y la famosa imagen de la Tierra apareciendo por el horizonte lunar (Figura 27), todo ello después de recorrer los 384.400 km de distancia que separan la Tierra de la Luna en tres días.



*Figura 27: La Tierra tras el horizonte lunar - Apolo 8 - NASA*

Por fin, y antes de terminar la década de los 60, como pretendía Kennedy, EE.UU. consiguió llevar a tres astronautas a la superficie lunar y hacerlos regresar sanos y salvos. La misión fue un éxito, marcando un hito histórico el día 20 de julio de 1969, pasando a la Historia los nombres de Neil Armstrong y Edwin Buzz Aldrin como primer y segundo hombres en pisar la Luna, al sur del 'Mar de la Tranquilidad' (Figuras 28, 29, 30 y 31), mientras su compañero Michael Collins tuvo que quedarse esperándolos en órbita lunar a bordo del módulo de mando (Columbia), para regresar posteriormente los tres a la Tierra y amerizar con normalidad en el Océano Pacífico el día 24 de julio de 1969.

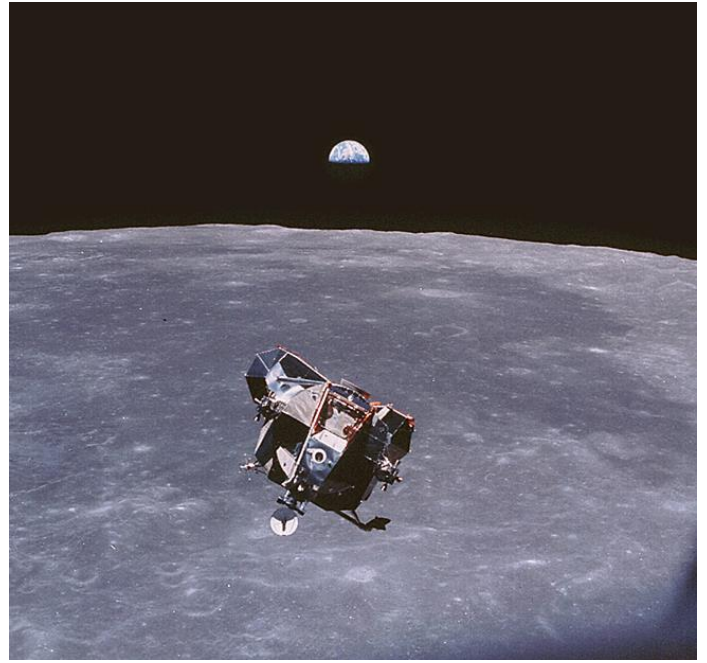


*Figura 28: Fotografía de Buzz Aldrin tomada por Neil Amstrong el día 21 de julio de 1969 en la superficie de la Luna (Mar de la Tranquilidad). Apolo 11 - NASA*





*Figura 29: Huella de Buzz Aldrin al pisar la Luna (Mar de la Tranquilidad) el 21 de julio de 1969.  
Apolo 11 - NASA*



*Figura 30: El Módulo Lunar del Apolo 11 (Eagle), con la Tierra al fondo, regresando de la superficie lunar para acoplarse con el Módulo de Mando (Columbia) - NASA*



*Figura 31: El Hombre pisa la Luna por primera vez en la Historia en el Mar de la Tranquilidad el día 21 de julio de 1969. Apolo 11 - NASA*

Todos los vuelos Apolo posteriores serían tripulados y se desarrollaron con éxito, salvo el Apolo 13 que fracasó en su misión de alunizar por tercera vez, pero que resultó un grandísimo éxito al conseguir devolver a los tres astronautas (James A. Lovell, Jack Swigert y Fred Haise) vivos a la Tierra en unas condiciones muy complicadas.

El Apolo 12 despegó desde el Centro Espacial Kennedy el 14 de noviembre de 1969 en medio de una tormenta. La caída de dos rayos durante los primeros instantes después de despegar sobre la estructura del cohete ocasionó algunos daños, pero una vez en órbita terrestre se revisaron todos los sistemas, concluyendo que el vehículo no había sufrido daños importantes que aconsejaran abortar la misión. El Control de la misión decidió ocultar a la tripulación la posibilidad de que a su regreso los paracaídas no se desplegaran, como consecuencia de los daños producidos por los rayos que atravesaron el cohete, cosa imposible de comprobar y que podría causar la muerte de los tres astronautas al estrellarse el Módulo de Mando de forma descontrolada en el Océano Pacífico. Afortunadamente los paracaídas funcionaron y la misión fue un éxito.

El día 19 alunizó de manera precisa en un lugar prefijado al sureste del '*Oceanus Procellarum*', al que la Unión Astronómica Internacional tuvo que nombrar como '*Mare Cognitum*' (mar conocido) debido a la acumulación de diversos vehículos enviados a la Luna en esa misma zona (Luna 5, Ranger 7 y Surveyor 3), tanto que la tripulación del Apolo 12 pudo recuperar algunas piezas de la Surveyor 3 para su análisis en la Tierra. También recogió 34 kg de muestras lunares (12 kg más que el Apolo 11) y pudieron contemplar por primera vez un eclipse de Sol provocado por la Tierra. La etapa de ascenso del módulo lunar quedó abandonada en órbita una vez los tripulantes ocuparon el módulo de mando, impactando sobre la superficie poco después y generando un movimiento sísmico que fue detectado por los instrumentos instalados por los astronautas en la superficie lunar, registrándose vibraciones durante más de una hora.

La siguiente misión que logró alunizar fue la Apolo 14, después de la fallida Apolo 13. Logró hacerlo sin contratiempos en el lugar que tenía hacerlo previsto la anterior, en '*Fra Mauro*', una zona montañosa de tierras altas distinta de los mares en los que alunizaron las misiones anteriores. A partir del Apolo 15 estas misiones de la NASA aumentaron en complejidad, duración, experimentos científicos, recogidas de material, e instalación de sensores y sismógrafos, poniendo fin a la exploración lunar norteamericana con el Apolo 17, que incluyó un experimento biológico consistente en llevar una tripulación extra de ratones, cinco ejemplares de 'ratoncillo de bolsillo' (*Perognathus longimembris*) que estuvieron sometidos a los rayos cósmicos. Cuatro de los ratoncillos volvieron a la Tierra con vida sin daños graves en los ojos o vísceras (solamente presentaron daños en el cuero cabelludo e hígado, pero sin poderse asegurar que tuvieran una relación directa con la exposición a los rayos cósmicos).

El Apolo 14 partió hacia la Luna el 31 de enero de 1971 y desarrolló dos EVA (actividades extravehiculares) importantes de más de 9 horas. El Apolo 15 se lanzó el día 26 de julio de 1971 hacia los *Apeninos lunares*, realizando tres EVA de más de 18 horas en total y utilizando por primera vez el LRV (*Lunar Roving Vehicle*), con el que hicieron casi 30 km explorando el entorno y recogiendo material (Figura 32).

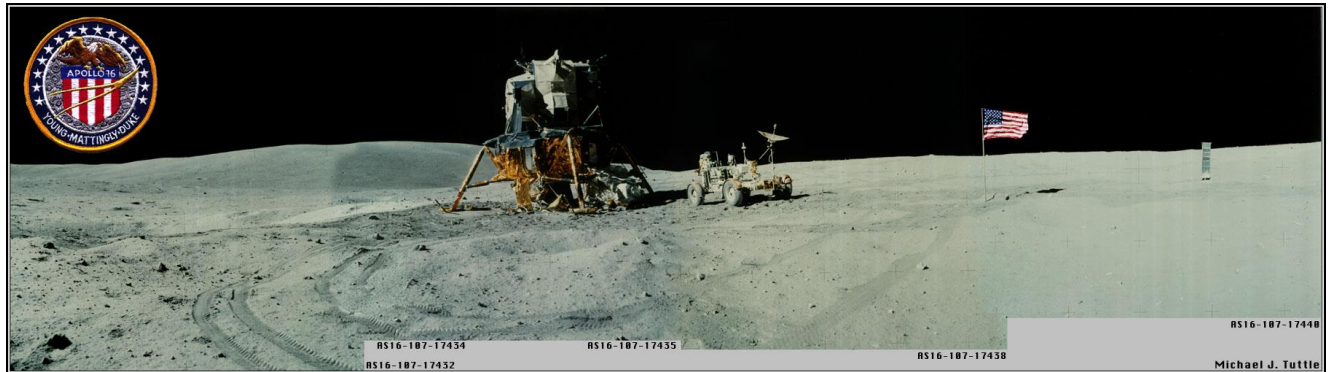
También por primera vez pudo grabarse el despegue del módulo lunar desde la superficie lunar con una cámara instalada en el rover, que lógicamente se quedó 'aparcado' en el satélite. El Apolo 16 fue lanzado desde el Centro Espacial Kennedy (Florida - EE.UU.) el día 16 de abril de 1972, realizando tareas análogas a las del Apolo 15 pero en las Montañas de Descartes y sus alrededores, y desple-



Figura 32: 'La Roca Génesis', anortosita de más de 4.000 millones de años recogida por el Apolo 15 - NASA



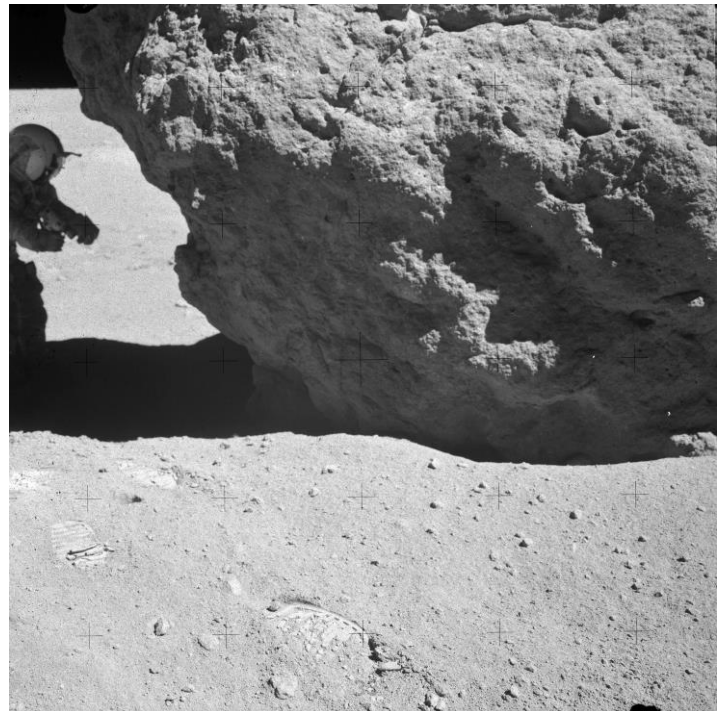
gando igualmente desde su módulo de mando un satélite artificial lunar (PFS-2) con el objeto de realizar experimentos científicos (partículas cargadas, campo magnético, gravedad lunar y toma de fotografías) (Figuras 33, 34 y 35).



*Figura 33: Apolo 16 - NASA*



*Figura 34: Módulo de Mando del Apolo 16 sobrevolando la superficie lunar - NASA*

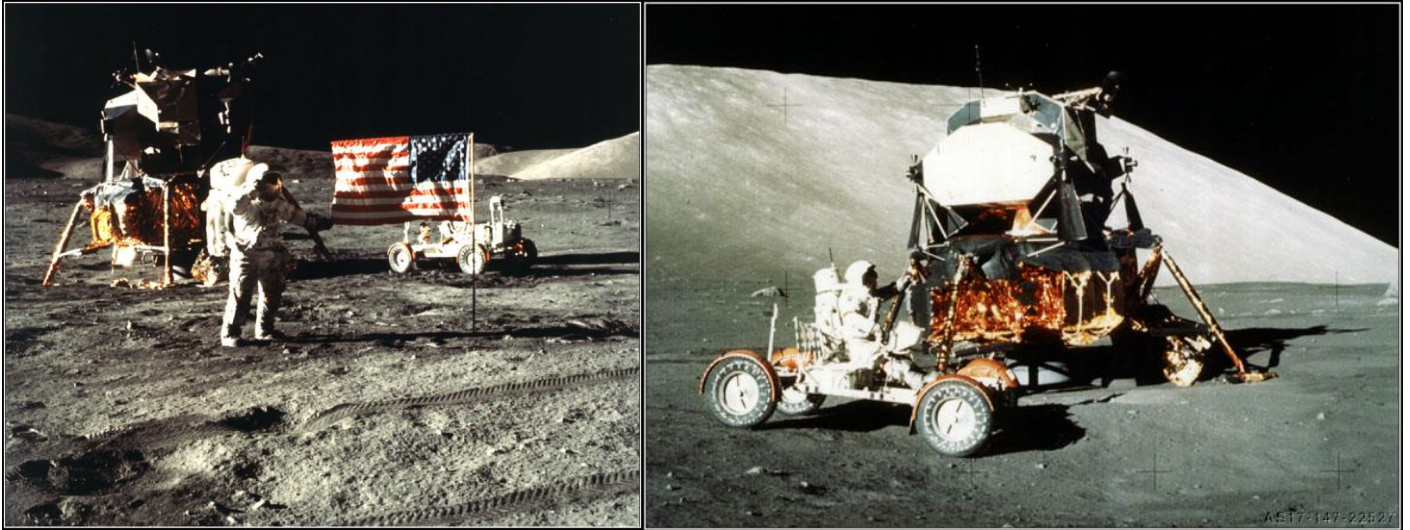


*Figura 35: 'Piedra de la Sombra' y el astronauta Charles Duke. Apolo 16 - NASA*

Por último, el Apolo 17 salió de la Tierra el día 7 de diciembre de 1972, siendo la última misión que llevaría seres humanos a la superficie lunar. El alunizaje se produjo en el valle *Taurus-Littrow*, batiendo todas las marcas anteriores de estancia en la Luna, de mayor tiempo en órbita lunar, de EVA más largas, de exploraciones a mayor distancia con el rover lunar y mayor tiempo de uso, de mayor cantidad de experimentos científicos y durante más tiempo, y de mayor recogida de material lunar (Figuras 36, 37 y 38).

La U.R.S.S. también participó en la exploración lunar, con vehículos automáticos robotizados y unos resultados menos espectaculares que los de las misiones Apolo, pero con un interés científico importante. Los soviéticos consiguieron enviar con éxito a la Luna tres naves dentro del Proyecto 'Luna', el 'Luna 16' lanzado el día 12 de septiembre de 1970, que logró el primer alunizaje





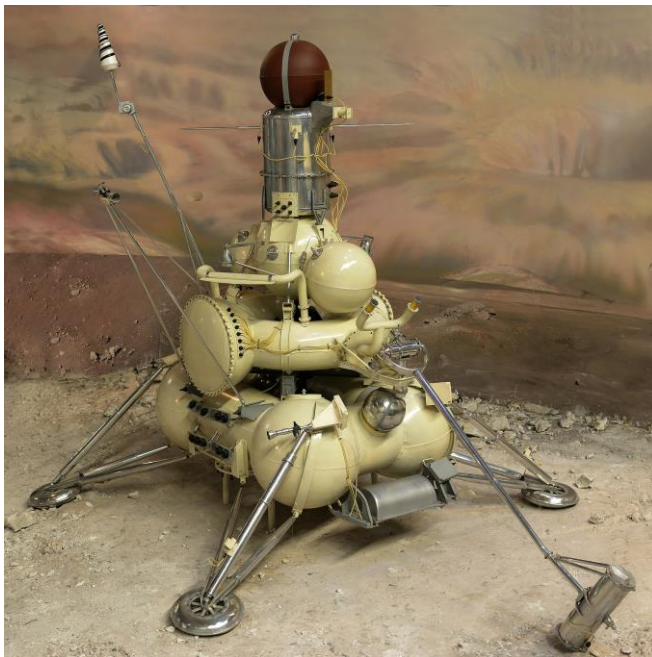
*Figuras 36 y 37: Apolo 17 - NASA*



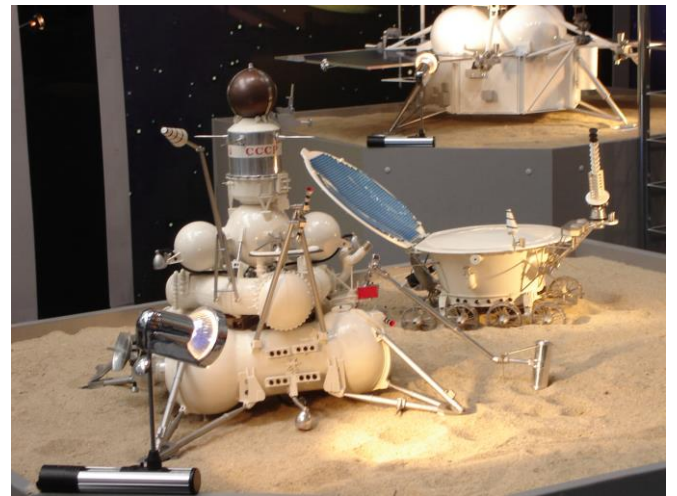
*Figura 38: El astronauta Eugene Cernan en la superficie lunar (valle Taurus-Littrow)  
13 de diciembre de 1972 - Apolo 17 - NASA*



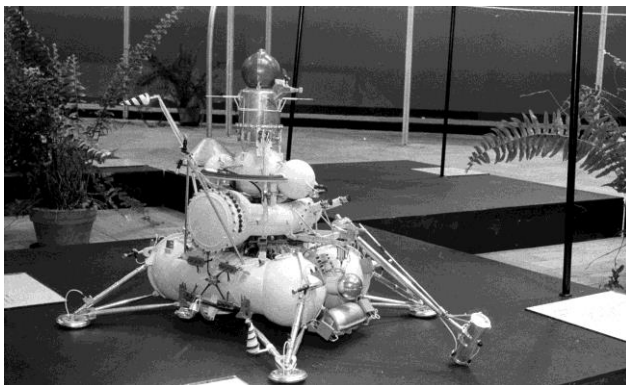
nocturno y estudió la gravedad lunar, regresando a la Tierra con más de 100 g de materiales. El 14 de febrero de 1972 partió para la Luna el vehículo 'Luna 20', que alunizó tres días después en 'Terra Apollonius' a unos 120 km del lugar al que llegó el 'Luna 16'. Tras una recogida de muestras, registro de radiación y temperatura, y toma de imágenes, retornó a la Tierra con 55 g de materiales que se compartieron con científicos de diversos países. Por último, el día 9 de agosto de 1976 despegó desde el Cosmódromo de Baikonur el 'Luna 24', alcanzando la Luna tres días después y alunizando en el 'Mare Crisium'. Regresó a la Tierra el día 22 de agosto con 170 g de suelo lunar, del que entregó una muestra a la NASA a finales de año. Cabe destacar también el programa soviético 'Lunokhod', que envió dos vehículos tipo 'rover' automáticos a la superficie lunar, el primero en noviembre de 1970 y el segundo en enero de 1973. Desde su alunizaje, el 'Lunokhod 2' fue el rover más pesado (836 kg) colocado en la superficie de un astro diferente de la Tierra hasta la llegada del 'Curiosity' (900 kg) norteamericano a Marte en el año 2012, y también fue el que recorrió mayor distancia (37 km) hasta el mes de julio de 2014 en que superó esa marca el rover marciano 'Opportunity' enviado por la NASA (Figuras 39 a 43).



*Figura 39: Misión espacial lunar soviética LUNA 16  
-Wikimedia Commons-*



*Figura 40: Modelo de la Misión espacial lunar soviética LUNA 20 y rover Lunokhod al fondo  
-Wikimedia Commons-*



*Figura 41: Modelo de la Misión espacial lunar soviética LUNA 24 -Wikimedia Commons-*



*Figura 42: Laboratorio automático lunar (rover) soviético Lunokhod-2 -Wikimedia Commons-*

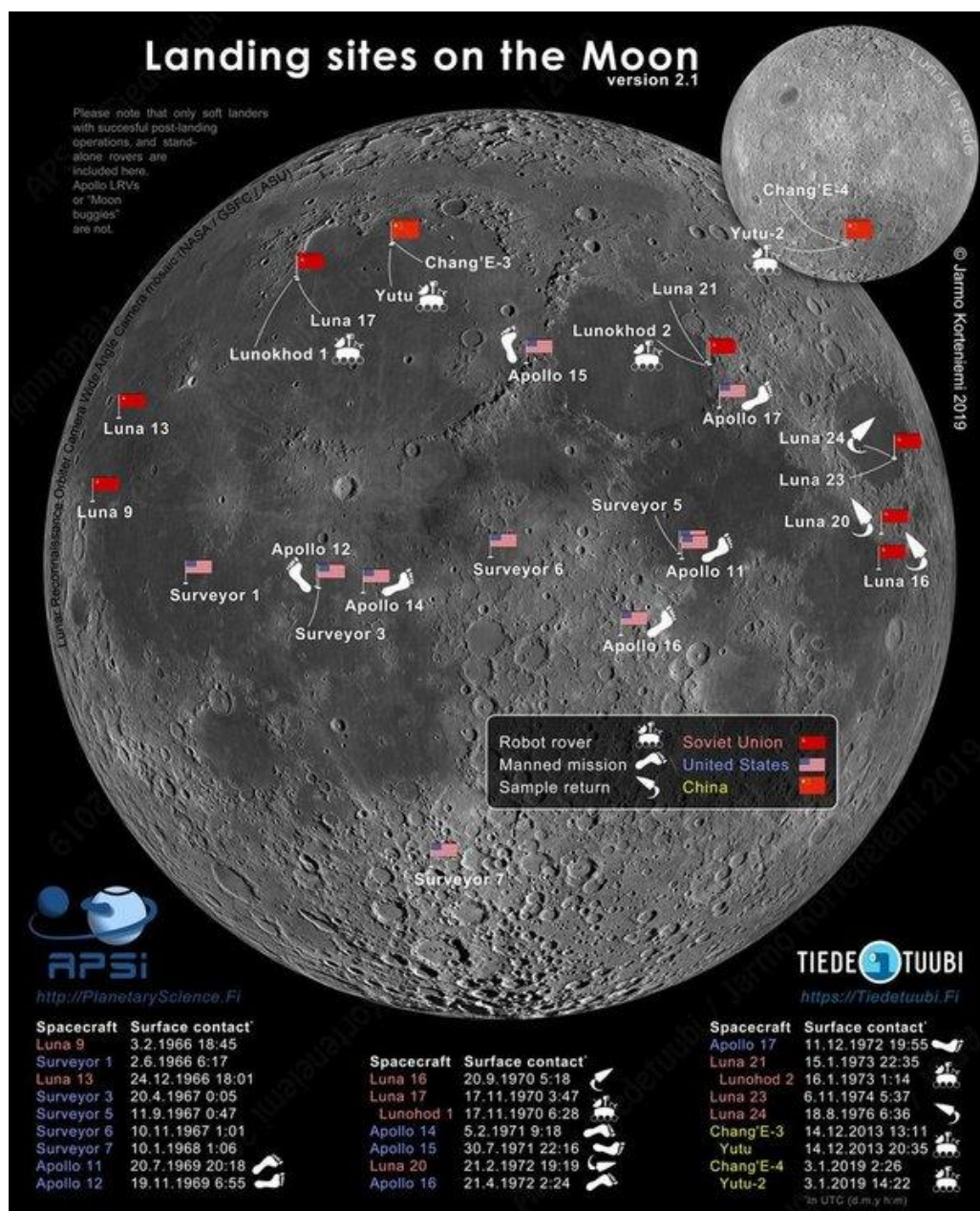


Figura 43: Lugares de alunizaje de algunas de las más importantes misiones de exploración -Crédito: Jarmo Korteniermi 2019-

Ningún ser humano ha pisado de nuevo la Luna desde el año 1972, aunque está previsto que lo haga de nuevo en un mega proyecto muy ambicioso denominado 'Artemis' (diosa y hermana gemela de Apolo en la mitología griega), que en el año 2025 enviará a la superficie lunar varios astronautas, entre los que se encontrará por primera vez en la Historia una mujer y una persona de color.

La NASA envió en el año 2009 una sonda espacial no tripulada a la Luna (Lunar Reconnaissance Orbiter -LRO-), con el propósito de realizar una exploración exhaustiva de la superficie lunar, centrándose particularmente en el estudio de las zonas polares, que son las más desconocidas, frías y con agua helada en el fondo de los cráteres más oscuros. Esas zonas en sombra permanente, que no reciben nunca la luz directa del Sol, son las más adecuadas para montar estaciones lunares en superficie. La 'LRO' también tenía entre sus cometidos localizar las mejores zonas de alunizaje para las futuras naves tripuladas con destino la Luna, cartografiando el satélite con



un nivel de detalle extraordinario y realizando más de 20 millones de fotografías (incluyendo la cara oculta).

El ambicioso programa 'Artemis' es un programa internacional participado por la NASA, varias Agencias Espaciales (ESA, JAXA, CSA) y Compañías comerciales privadas relacionadas con la exploración espacial, con el propósito inicial de retomar la exploración tripulada de la Luna iniciada con el Programa Apolo, pero con objetivos más ambiciosos, como establecer bases permanentes en nuestro satélite, explotar los recursos lunares con fines comerciales, y hacer de la Luna una estación intermedia para la exploración y el envío de naves tripuladas a Marte (Figura 44).

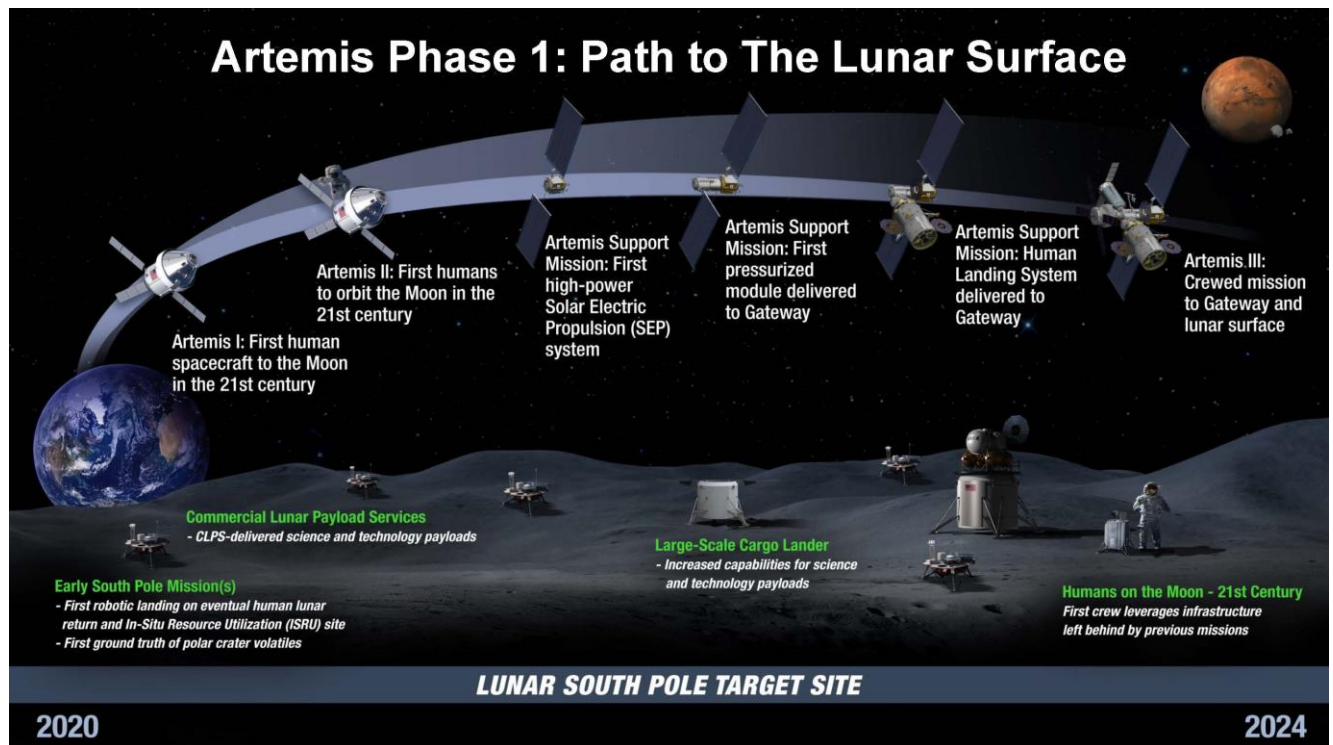


Figura 44: Misiones Artemis -nasa.gov-

Para comprender la complejidad de este nuevo proyecto basta mencionar algunas de sus características más importantes, como son el disponer del lanzador más potente hasta el momento actual, denominado SLS (Sistema de Lanzamiento Espacial), con capacidad para enviar al espacio una carga de más de 130 toneladas; la nave espacial 'Orion', capaz de llevar en su interior hasta cuatro astronautas, de los 13 que conforman la misión (6 mujeres y 7 hombres), durante 21 días; la construcción de una estación espacial en órbita lunar (Gateway); la nave espacial 'Starship' de la Compañía 'Space X' que llevará a los astronautas desde la órbita lunar hasta la superficie, y los devolverá posteriormente hasta la cápsula 'Orion'; Vehículos tipo rover como el 'VIPER' (Volatiles Investigating Polar Exploration Rover) y el 'SEV' (Space Exploration Vehicle) para la exploración en la superficie lunar; o la construcción de un Puesto Avanzado de Superficie (Base permanente o semipermanente).

Los integrantes de las futuras colonias lunares encontrarán huellas humanas que fueron esculpidas en la superficie polvorienta en los años 70 del pasado siglo, así como cámaras de vídeo, banderas, tres vehículos rover lunares, sondas 'aletargadas', herramientas para recolectar muestras del suelo, y hasta con una foto de familia; objetos y marcas que los astronautas de las misiones Apolo de la NASA dejaron atrás al volver a casa, y del resto de misiones no tripuladas que exploraron la superficie lunar y quedaron intactas a su término.

## LA LUNA Y OTROS SATÉLITES DEL SISTEMA SOLAR

*"La luna es el primer hito del camino hacia las estrellas"*  
Arthur C. Clarke (1917-2008)

Ninguno de los cuatro planetas interiores del Sistema Solar (Mercurio, Venus, Tierra y Marte) tiene satélites, si consideramos a la Tierra un 'planeta binario' (Figura 45) y si aceptamos que Fobos y Deimos son en realidad dos asteroides capturados por Marte.

Ya sabemos cómo se ve la Luna en nuestro cielo, pero en Marte sus dos lunas se verían de forma muy distinta. Fobos, que es la mayor y tiene forma de 'patata' (27 km x 22 km x 18 km) tiene un tamaño aparente en el cielo marciano tres veces menor que nuestra Luna, apareciendo por el horizonte oeste y poniéndose por el este dos veces cada día marciano. Este fenómeno no puede seguirse desde zonas polares, dado que el satélite se mueve alrededor del ecuador marciano y es muy pequeño. Deimos es otra 'patata cósmica' (Figura 07) con unas dimensiones de 15 km x 12 km x 10 km, y desde la superficie marciana apenas se ve como una estrella brillante, más o menos como vemos Venus en nuestro cielo. Al contrario que Fobos, sale por el este y se pone por el oeste, recorriendo el cielo en casi tres días marcianos debido a que su periodo de traslación es un poco mayor que la duración del día marciano.



*Figura 45: La Tierra y la Luna -NASA-*

Una vez rebasado el cinturón de asteroides hacia el exterior, el panorama es completamente distinto, en el reino de los planetas exteriores todos tienen satélites, que suman un total de 216 entre los de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno (Figura 46).

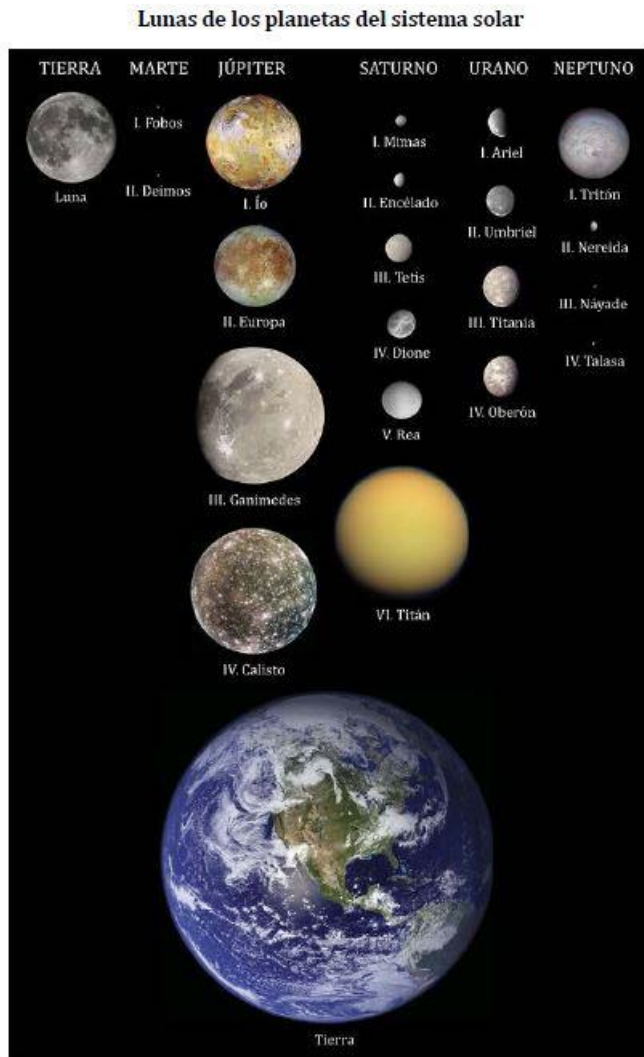


Figura 46: Satélites principales en el Sistema Solar. Imagen: Anuario Astronómico 2023 -Observatorio Astronómico Nacional (IGN)-

El planeta que más satélites tiene es Júpiter con 92, seguido por Saturno con 83, Urano con 27 y Neptuno con 14. Entre ellos, los más grandes rivalizan con varios planetas en tamaño, atmósfera, mares de agua (helados o líquidos bajo la superficie), actividad sísmica y vulcanológica, etc...

La Luna (3475 km Ø) es la quinta mayor luna en el Sistema Solar después de Ganímedes (5262 km Ø), Titán (5150 km Ø), Calisto (4821 km Ø) e Io (3643 km Ø), siendo Ganímedes y Titán mayores que el planeta Mercurio (4879,4 km Ø) que supera a Calisto por muy poco.

El mayor satélite del Sistema Solar es Ganímedes, el tercer satélite en orden de distancia a Júpiter, descubierto por Galileo Galilei en el año 1610. Es mayor que el planeta Mercurio y algo menor que Marte (6792,4 km Ø), no tiene atmósfera apreciable y su temperatura superficial se acerca a los -200 °C. Presenta cráteres y cordilleras de cierto parecido a la Luna, aunque de material completamente distinto (silicatos y agua helada), y se cree que puede tener bajo la corteza grandes cantidades de agua líquida.

Titán es el segundo gran satélite del Sistema Solar en cuanto a tamaño, es el mayor de Saturno y el único que tiene una atmósfera densa, incluso más densa que la terrestre (1600 hPa en superficie). El 14 de enero de 2005 la sonda 'Huygens' logró posarse en la superficie de este gran satélite, tras separarse de la nave 'Cassini', ofreciendo imágenes y datos de la superficie y de la atmósfera que nos han permitido conocer mucho mejor las características globales de este apasionante y helado mundo.

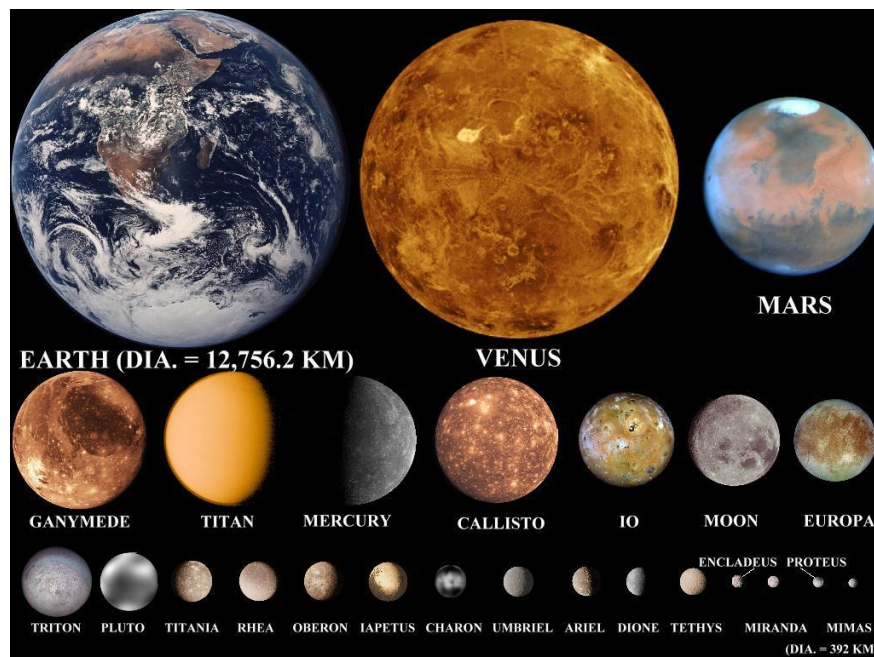
La atmósfera de Titán está compuesta por nitrógeno (94%) y otros compuestos (5%), mayormente hidrocarburos como el metano, y en menor medida etano, acetileno, metilacetileno, diacetileno, cianoacetileno, propano, CO<sub>2</sub>, CO, cianógeno, cianuro de hidrógeno, helio y compuestos químicos complejos, resultado de la fuerte actividad fotoquímica en la atmósfera superior. Particularmente interesante resulta la presencia de cianuro de hidrógeno, nitrilo precursor de las purinas, constituyentes de los ácidos nucleicos presentes en las células vivas.

Titán es el único lugar del Sistema Solar, junto con La Tierra, donde se producen precipitaciones que dan lugar a ríos y lagos, aunque aquí los fenómenos meteorológicos no tienen su base en el agua, sino en el metano líquido, que es el componente principal de las nubes tormentosas de gran desarrollo vertical (hasta 35 km) que descargan importantes cantidades de precipitación. También existen nubes tipo cirros en la estratosfera de Titán, a una altitud de entre 50 y 100 km, compuestas por cristales de hidrocarburos. La temperatura ambiente media es de -180 °C, y

existen vapores brumosos próximos a ríos y lagos, o tras las lluvias; la superficie anaranjada y fría es arcillosa y blanda, con rocas dispersas y bloques de hielo, en la que puede haber actividad volcánica con erupciones de agua mezclada con amoníaco. Se han detectado vientos dominantes del oeste, que en superficie tienen velocidades de entre 50 y 100 km/h, llegando hasta 200 km/h en zonas altas de la atmósfera. Entre esa niebla anaranjada y espesa en la alta atmósfera, y la lejanía al Sol, la luminosidad en un día cualquiera en Titán puede asemejarse a la crepuscular terrestre.

La baja densidad media ( $< 2 \text{ gr/cm}^3$ ) hace pensar que está compuesto por una mezcla de hielo y roca, con un manto arcilloso y posiblemente con un océano de agua con amoníaco disuelto y diversos hidrocarburos, a una profundidad de unos 100 km. Tiene una rotación capturada (síncrona) con un periodo de 15,945421 días.

Calisto es el tercer satélite más grande, otro satélite galileano de Júpiter (junto con Io, Europa y Ganímedes) que se caracteriza por presentar muchísimos cráteres de impacto. No tiene actividad geológica ni calor interno generado por fuerzas de marea, como en el caso de Io y en menor medida en Europa y Ganímedes. Se registran temperaturas superficiales de entre  $-190 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-120 \text{ }^{\circ}\text{C}$  según sea zona iluminada u oscura, polar o ecuatorial, y tiene una atmósfera extremadamente fina de dióxido de carbono y oxígeno molecular. Se estima que debe tener también unas cantidades muy importantes de agua en el subsuelo.



*Figura 47: Tamaño comparado de los planetas interiores del Sistema Solar y los mayores satélites*

El último de los satélites mayores que la Luna es Io, el más cercano a Júpiter y otro de los cuatro galileanos que acompañan al planeta gigante (Figura 47). Se mueve dentro de la magnetosfera del gigante Júpiter, y está sometido a unas fuerzas de marea tan intensas que le convierten en el astro del Sistema Solar con mayor actividad volcánica y sísmica, con cientos de volcanes activos a causa del intenso calor interno. En su superficie, donde no quedan rastros de cráteres de impacto, debido sobre todo a las continuas erupciones volcánicas que dan lugar a numerosos lagos de azufre y a ríos de compuestos de azufre y silicatos, la temperatura superficial media es baja, del orden de  $-145 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , aunque los materiales expulsados de los volcanes alcanzan temperaturas de más de  $+400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . En Io no se han detectado cantidades apreciables de agua, y el dióxido de



azufre proveniente de las erupciones volcánicas, es el componente principal de su tenue atmósfera.

Europa está detrás de la Luna en cuanto a tamaño, pero merece la pena mencionarla, dado que es posiblemente uno de los cuerpos del Sistema Solar con mayor cantidad de agua líquida en el subsuelo y posibilidades de sostener algún tipo de vida. Europa posee vestigios de oxígeno gaseoso en su superficie, resultado de la descomposición del vapor de agua por la radiación solar, que continuamente se va perdiendo debido a la escasa fuerza gravitatoria, y se va reponiendo a expensas de la sublimación del hielo superficial. Esta luna tiene una superficie muy lisa, con un océano de agua de más de 100 km de profundidad que la rodea completamente, y que en la superficie se manifiesta como una gran costra de hielo de unos 20 km de espesor, que presenta grandes fracturas debidas a las tensiones gravitatorias con Júpiter; las fuerzas de marea generan el calor interno suficiente como para dar lugar al vasto océano de agua líquida bajo dicha cubierta de hielo. La temperatura en superficie oscila entre los -160 °C en la zona soleada y por debajo de -200 °C en los polos y zonas no expuestas al sol.

Elementos orbitales					
planeta	satélite	semieje mayor (10 <sup>3</sup> km)	excentricidad (en R <sub>p</sub> )	inclinación (°)	máxima elongac.
Tierra:					
	Luna	384,400	60,27	0,0554	5,160
Marte:					
I	Fobos	9,378	2,76	0,0151	1,075 25"
II	Deimos	23,459	6,91	0,0005	1,788 1' 03"
Júpiter:					
I	Io	421,8	5,90	0,0041	0,036 2' 19"
II	Europa	671,1	9,39	0,0094	0,466 3' 41"
III	Ganimedes	1070,4	14,97	0,0013	0,177 5' 52"
IV	Calisto	1882,7	26,33	0,0074	0,192 10' 19"
V	Amaltea	181,4	2,54	0,0032	0,380 1' 00"
VI	Himalia	11461	160,31	0,1586	28,612 1° 02' 39"
VII	Elara	11741	164,23	0,2108	27,945 1° 04' 10"
VIII	Pasífae	23624	330,44	0,4062	151,413 2° 09' 07"
IX	Sinope	23939	334,85	0,2552	158,189 2° 10' 50"
X	Lisitea	11717	163,89	0,1161	27,663 1° 04' 10"
XI	Carme	23404	327,37	0,2546	164,994 2° 07' 52"
XII	Ananké	21276	297,60	0,2332	148,693 1° 56' 09"
XIII	Leda	11165	156,17	0,1624	27,882 1° 01' 02"
XIV	Tebe	221,9	3,10	0,0176	1,080 1' 13"
XV	Adrastea	129,0	1,80	0,0015	0,054 42"
XVI	Metis	128,0	1,79	0,0002	0,019 42"
XVII	Calíroo	24102	337,13	0,2796	147,080 2° 11' 41"
XVIII	Temisto	7507	105,00	0,2435	42,977 41' 01"
Saturno:					
I	Mimas	185,539	3,08	0,0202	1,574 30"
II	Encélado	238,042	3,95	0,0045	0,003 38"
III	Tetis	294,672	4,89	0,0001	1,091 48"
IV	Dione	377,415	6,26	0,0022	0,028 1' 01"
V	Rea	527,068	8,75	0,0010	0,333 1' 25"
VI	Titán	1221,865	20,27	0,0292	0,306 3' 17"
VII	Hiperión	1500,933	24,90	0,1045	0,615 4' 02"
VIII	Jápeto	3560,854	59,08	0,0283	8,298 9' 35"
IX	Febe	12944,3	214,84	0,1634	175,243 34' 51"
X	Jano	151,472	2,51	0,007	0,165 24"
XI	Epimeteo	151,422	2,51	0,009	0,335 24"
XII	Helena	377,440	6,26	~0	0,213 1' 01"
XIII	Telesto	294,720	4,89	0,001	1,158 48"
XIV	Calipso	294,720	4,89	0,001	1,473 48"
XV	Atlas	137,670	2,29	~0	0,003 22"
XVI	Prometeo	139,353	2,28	0,0020	0,007 23"
XVII	Pandora	141,700	2,35	0,0042	0,050 23"
XVIII	Pan	133,585	2,22	~0	~0 22"

Elementos orbitales					
planeta	satélite	semieje mayor (10 <sup>3</sup> km)	excentricidad (en R <sub>p</sub> )	inclinación (°)	máxima elongac.
Urano:					
I	Ariel	190,9	7,47	0,0012	0,041 14"
II	Umbriel	266,0	10,41	0,0039	0,128 20"
III	Titania	436,3	17,07	0,0011	0,079 33"
IV	Oberón	583,5	22,83	0,0014	0,068 44"
V	Miranda	129,9	5,08	0,0013	4,338 10"
VI	Cordelia	49,8	1,95	0,0003	0,085 4"
VII	Ofelia	53,8	2,10	0,0099	0,104 4"
VIII	Bianca	59,2	2,32	0,0009	0,193 4"
IX	Cresida	61,8	2,42	0,0004	0,006 5"
X	Desdémona	62,7	2,45	0,0001	0,113 5"
XI	Julieta	64,4	2,52	0,0007	0,065 5"
XII	Porcia	66,1	2,59	0,0001	0,059 5"
XIII	Rosalinda	69,9	2,73	0,0001	0,279 5"
XIV	Belinda	75,3	2,95	0,0001	0,031 6"
XV	Puck	86,0	3,36	0,0001	0,319 6"
XVI	Calibán	7231,0	282,9	0,1812	141,529 9' 06"
XVII	Sícorax	12179,0	476,5	0,5219	159,420 15' 20"
XVIII	Próspero	16256,0	636,0	0,4445	151,830 20' 30"
XIX	Setebos	17418,0	681,5	0,5908	158,235 21' 56"
XX	Esteban	8004,0	313,2	0,2248	143,819 10' 05"
Neptuno:					
I	Tritón	354,759	14,33	~0	156,865 17"
II	Nereida	5513,818	222,65	0,7507	7,090 4' 20"
III	Náyade	48,227	1,95	0,0003	4,691 2"
IV	Talasa	50,074	2,02	0,0002	0,135 2"
V	Despina	52,526	2,12	0,0002	0,068 2"
VI	Galatea	61,953	2,50	0,0001	0,034 3"
VII	Larisa	73,548	2,97	0,0014	0,205 3"
VIII	Proteo	117,646	4,75	0,0005	0,075 6"

*Elementos orbitales de los principales satélites de los planetas del Sistema Solar. Anuario del Real Observatorio Astronómico 2023 (OAN-IGN)*

Periodos y descubrimiento				
planeta	satélite	periodo orbital (d)	periodo de rotación (d)	descubrimiento
Tierra:				
	Luna	27,321661	sincr.	
Marte:				
I	Fobos	0,318910	sincr.	1877 A.Hall
II	Deimos	1,262441	sincr.	1877 A.Hall
Júpiter:				
I	Io	1,769138	sincr.	1610 Galileo
II	Europa	3,551181	sincr.	1610 Galileo
III	Ganimedes	7,154553	sincr.	1610 Galileo
IV	Calisto	16,689017	sincr.	1610 Galileo
V	Amaltea	0,498179	sincr.	1892 E.Barnard
VI	Himalia	250,5662	0,4	1904 C.Perrine
VII	Elara	259,6528	0,5	1905 C.Perrine
VIII	Pasífae	R 743,0		1908 P.Melotte
IX	Sinope	R 758,9		1914 S.Nicholson
X	Lisitea	259,22		1938 S.Nicholson
XI	Carme	R 734,2		1938 S.Nicholson
XII	Ananké	R 629,8		1951 S.Nicholson
XIII	Leda	240,92		1974 C.Kowal
XIV	Tebe	0,6745	sincr.	1979 Voyager 1
XV	Adrastea	0,298260	sincr.	1979 Voyager 1
XVI	Metis	0,294780	sincr.	1979 Voyager 1
XVII	Calíroo	R 758,8		1999 Spacewatch, MPC
XVIII	Temisto	130,02		1975/2000 SJFM
Saturno:				
I	Mimas	0,942422	sincr.	1789 W.Herschel
II	Encélado	1,370218	sincr.	1789 W.Herschel
III	Tetis	1,887802	sincr.	1684 G.Cassini
IV	Dione	2,736915	sincr.	1684 G.Cassini
V	Rea	4,517500	sincr.	1672 G.Cassini
VI	Titán	15,945421	sincr.	1655 C.Huygens
VII	Hiperión	21,276609		1848 Bond et al
VIII	Jápeto	79,330183	sincr.	1671 G.Cassini
IX	Febe	R 548,2	0,4	1898 W.Pickering
X	Jano	0,6945	sincr.	1966 A.Dollfus
XI	Epimeteo	0,6942	sincr.	1978 Fountain et al
XII	Helena	2,7369		1980 Laques et al
XIII	Telesto	1,8878		1980 Smith et al
XIV	Calipso	1,8878		1980 Pascu et al
XV	Atlas	0,6019		1980 Voyager 1
XVI	Prometeo	0,6130		1980 Voyager 1
XVII	Pandora	0,6285		1980 Voyager 1
XVIII	Pan	0,5750		1990 M.Showalter

Periodos y descubrimiento				
planeta	satélite	periodo orbital (d)	periodo de rotación (d)	descubrimiento
Urano:				
I	Ariel	2,520379	sincr.	1851 W.Lassell
II	Umbriel	4,144176	sincr.	1851 W.Lassell
III	Titania	8,705867	sincr.	1787 W.Herschel
IV	Oberón	13,463234	sincr.	1787 W.Herschel
V	Miranda	1,413479	sincr.	1948 G.Kuiper
VI	Cordelia	0,335034		1986 Voyager 2
VII	Ofelia	0,376400		1986 Voyager 2
VIII	Bianca	0,434579		1986 Voyager 2
IX	Cresida	0,463570		1986 Voyager 2
X	Desdémona	0,473650		1986 Voyager 2
XI	Julietta	0,493065		1986 Voyager 2
XII	Porcia	0,513196		1986 Voyager 2
XIII	Rosalinda	0,558460		1986 Voyager 2
XIV	Belinda	0,623527		1986 Voyager 2
XV	Puck	0,761833		1985 Voyager 2
XVI	Calibán	R 579,5		1997 Gladman et al
XVII	Sícorax	R 1283,4		1997 Gladman et al
XVIII	Próspero	R 1977,3		1999 Holman et al
XIX	Setebos	R 2234,8		1999 Kavelaars et al
XX	Esteban	R 676,5		1999 Gladman et al
Neptuno:				
I	Tritón	R 5,876854	sincr.	1846 W.Lassell
II	Nereida	360,13619		1949 G.Kuiper
III	Náyade	0,294396		1989 Voyager 2
IV	Talasa	0,311485		1989 Voyager 2
V	Despina	0,334655		1989 Voyager 2
VI	Galatea	0,428745		1989 Voyager 2
VII	Larisa	0,554654		1989 Voyager 2
VIII	Proteo	1,122315		1989 Voyager 2

*Periodos y descubrimiento de los principales satélites de los planetas del Sistema Solar. Anuario del Real Observatorio Astronómico 2023 (OAN-IGN)*

Datos físicos y fotométricos

planeta	satélite	diámetro (km)	masa ( $10^{20}$ kg)	densidad ( $\text{g cm}^{-3}$ )	magn. oposic.	albedo geom.
Tierra:						
	Luna	3475	735	3,344	-12,74	0,12
Marte:						
I	Fobos	27×22×18	$1,1 \cdot 10^{-4}$	1,872	11,4	0,07
II	Deimos	15×12×10	$1,5 \cdot 10^{-5}$	1,471	12,45	0,07
Júpiter:						
I	Io	3643	893	3,528	5,02	0,62
II	Europa	3122	480	3,013	5,29	0,68
III	Ganimedes	5262	1482	1,942	4,61	0,44
IV	Calisto	4821	1076	1,834	5,65	0,19
V	Amaltea	250×146×128	0,075	0,925	14,1	0,09
VI	Himalia	170	0,095	0,883	14,3 R	0,03
VII	Elara	80	0,008	2,6	16,6 R	0,03
VIII	Pasífae	36	0,003	2,6	16,9 R	0,10
IX	Sinope	28	0,001	2,6	18,3 R	0,05
X	Lisitea	24	0,001	2,6	18,2 R	0,06
XI	Carme	30	0,001	2,6	17,1 R	0,06
XII	Ananké	20	$4 \cdot 10^{-4}$	2,6	18,9 R	0,06
XIII	Leda	10	$6 \cdot 10^{-5}$	2,6	19,2 R	0,07
XIV	Tebe	116×98×84	0,008	0,900	16,0	0,05
XV	Adrastea	25 ×20×15	$2 \cdot 10^{-4}$	0,902	18,7	0,10
XVI	Metis	60×40×34	0,001	0,900	17,5	0,06
XVII	Calíroeo	8			20,8 R	0,04
XVIII	Temisto	8			21,0 R	0,04
Saturno:						
I	Mimas	416×394×382	0,379	1,150	12,8	0,6
II	Encélado	514×502×456	1,079	1,610	11,8	1,0
III	Tetis	1076×1056×1052	6,174	0,984	10,2	0,8
IV	Dione	1126×1122×1120	10,955	1,478	10,4	0,7
V	Rea	1530×1526×1524	23,065	1,237	9,6	0,7
VI	Titán	5150	1345,185	1,881	8,4	0,22
VII	Hiperión	360×266×209	0,056	0,539	14,4	0,3
VIII	Jápeto	1492×1492×1424	18,055	1,089	11	0,5
IX	Febe	218×218×204	0,083	1,643	16,4	0,08
X	Jano	204×186×152	0,019	0,638	14,4	0,9
XI	Epimeteo	130×124×106	0,005	0,638	15,6	0,8
XII	Helena	44×38×26	$3 \cdot 10^{-4}$	1,292	18,4	0,7
XIII	Telesto	32×24×20	$7 \cdot 10^{-5}$	1,000	18,5	1,0
XIV	Calipso	30×24×14	$4 \cdot 10^{-5}$	1,000	18,7	1,0
XV	Atlas	40×39×18	$7 \cdot 10^{-5}$	0,385	19,0	0,8
XVI	Prometeo	96×80×60	0,002	0,478	15,8	0,5
XVII	Pandora	104×82×64	0,001	0,495	16,4	0,7
XVIII	Pan	34×32×30	$5 \cdot 10^{-5}$	0,365	19,4	0,5

Datos físicos y fotométricos

planeta	satélite	diámetro (km)	masa ( $10^{20}$ kg)	densidad ( $\text{g cm}^{-3}$ )	magn. oposic.	albedo geom.
Urano:						
I	Ariel	1162×1156×1155	12,945	1,539	13,70	0,39
II	Umbriel	1169	12,211	1,523	14,47	0,21
III	Titania	1578	34,191	1,653	13,49	0,27
IV	Oberón	1523	28,827	1,664	13,70	0,23
V	Miranda	481×468×466	0,659	1,178	15,79	0,32
VI	Cordelia	40	$4 \cdot 10^{-4}$	1,3	23,62	0,07
VII	Ofelia	43	$5 \cdot 10^{-4}$	1,3	23,26	0,07
VIII	Bianca	54	$9 \cdot 10^{-4}$	1,3	22,52	0,07
IX	Cresida	82	0,003	1,3	21,58	0,07
X	Desdémona	70	0,002	1,3	21,99	0,08
XI	Julieta	106	0,006	1,3	21,12	0,08
XII	Porcia	140	0,017	1,3	20,42	0,07
XIII	Rosalinda	72	0,003	1,3	21,79	0,07
XIV	Belinda	72	0,005	1,3	21,47	0,07
XV	Puck	162	0,029	1,3	19,75	0,10
XVI	Calibán	72	0,003	1,3	22,4 R	0,04
XVII	Sícorax	150	0,023	1,3	20,8 R	0,04
XVIII	Próspero	50	0,001	1,3	23,2 R	0,04
XIX	Setebos	48	0,001	1,3	23,3 R	0,04
XX	Esteban	32	$2 \cdot 10^{-4}$	1,3	24,1 R	0,04
Neptuno:						
I	Tritón	2707	213,896	2,065	13,54	0,72
II	Nereida	~340	0,270		19,2 R	0,16
III	Náyade	96×60×52	0,002	1,251	23,91	0,07
IV	Talasa	108×100×52	0,004	1,318	23,32	0,09
V	Despina	180×148×128	0,021	1,030	22,00	0,09
VI	Galatea	204×184×144	0,037	1,378	21,85	0,08
VII	Larisa	216×204×168	0,049	1,030	21,49	0,09
VIII	Proteo	436×416×402	0,503	1,027	19,75	0,10

*Datos físicos y fotométricos de los principales satélites de los planetas del Sistema Solar. Anuario del Real Observatorio Astronómico 2023 (OAN-IGN)*

## LA LUNA Y LA HUMANIDAD

*"En el majestuoso conjunto de la creación, nada hay que me conmueva tan hondamente, que acaricie mi espíritu y dé vuelo a mi fantasía como la luz apacible y desmayada de la luna"*  
Gustavo Adolfo Bécquer (1836-1870)

Mucho antes de la aparición de la Humanidad ya estaba la Luna iluminando nuestros cielos. Es el astro que más fácilmente se puede identificar en la bóveda celeste, y como hemos visto gira alrededor de la Tierra en un plano muy próximo a la eclíptica, razón por la cual todos los planetas, la Luna y el Sol parecen recorrer el cielo por el mismo 'camino'.

Hace decenas de miles de años, cuando el ser humano vivía en las cavernas y se dedicaba a cazar, la Luna formaba parte del paisaje, pero no de una forma decorativa o como un adorno celeste, sino como elemento interviniente que afectaba a todos los seres vivos. El Hombre se percató rápidamente de los regulares ciclos lunares y estableció primitivos calendarios muy útiles para regular su actividad rutinaria, su orientación y los momentos más adecuados para determinadas actividades, sobre todo cuando se hizo sedentario, ganadero y agricultor. Para las actividades agrícolas se necesitaba imperiosamente conocer los momentos más adecuados para la siembra y la cosecha a lo largo del año. La Luna supuso un elemento fundamental para la determinación de un patrón de tiempo que señalara el inicio y el fin de las estaciones, y la duración de los meses y los años.

Las primeras civilizaciones humanas supieron reconocer que el Sol, la Luna y los cinco planetas visibles a simple vista, se movían por el cielo en una estrecha franja dividida en 12 constelaciones, a la que posteriormente se denominó 'zodiaco'. La consideración de 'dioses' que se les atribuyó a los astros que por ella se movían, en contraste con la aparente quietud del fondo de estrellas 'fijas', daría lugar posteriormente a la Astrología. Los eclipses también tenían lugar, lógicamente, en alguna de las constelaciones del zodiaco, y suponían una alteración tan grande de la armonía celestial (la Luna se volvía oscura y rojiza, y el Sol desaparecía del cielo por unos instantes aterradores), que para la mayoría eran presagio de catástrofes, guerras o desgracias, o simplemente expresiones divinas de mensajes a la Humanidad que naturalmente había que interpretar. El cielo nocturno pasó de ser un mero regulador de las actividades humanas, a ser además la morada de los dioses (Figura 48).



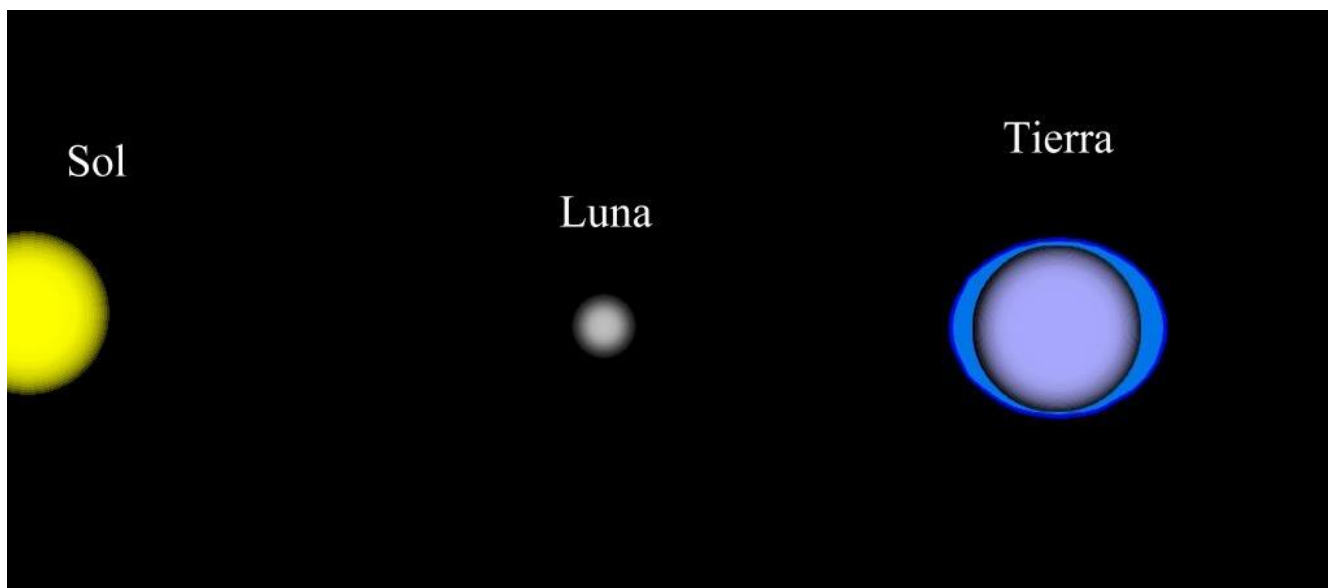
Figura 48: Dibujo de la Tierra y la Luna. Autor: Julio Solís García





*Figura 49: La Tierra y la Luna. -NASA-*

A la Luna le bastaron tres de sus numerosas características especiales para influir de manera determinante en la vida del ser humano. La primera es su masa, solamente 81,26 veces menor que la de la Tierra (Figura 49) y que en este baile celestial del planeta doble 'Tierra-Luna', la influencia gravitacional de la una sobre la otra genera unas fuerzas de marea notables, por un lado la Tierra tira tanto de la Luna que desplaza su manto hacia el exterior, haciendo menos profunda la corteza de la cara visible, y por otro la Luna, que junto con el Sol crea unas mareas muy notables en los océanos y mares terrestres, que se van sucediendo al ritmo de las fases lunares; el agua 'siente' la atracción gravitatoria lunar 'acercándose' unos metros hacia nuestro satélite y subiendo de nivel, generando una protuberancia que sigue a la Luna mientras se desplaza (Figura 50).



*Figura 50: Mareas terrestres ocasionadas por la Luna y el Sol.  
Imagen: Julio Solís García*

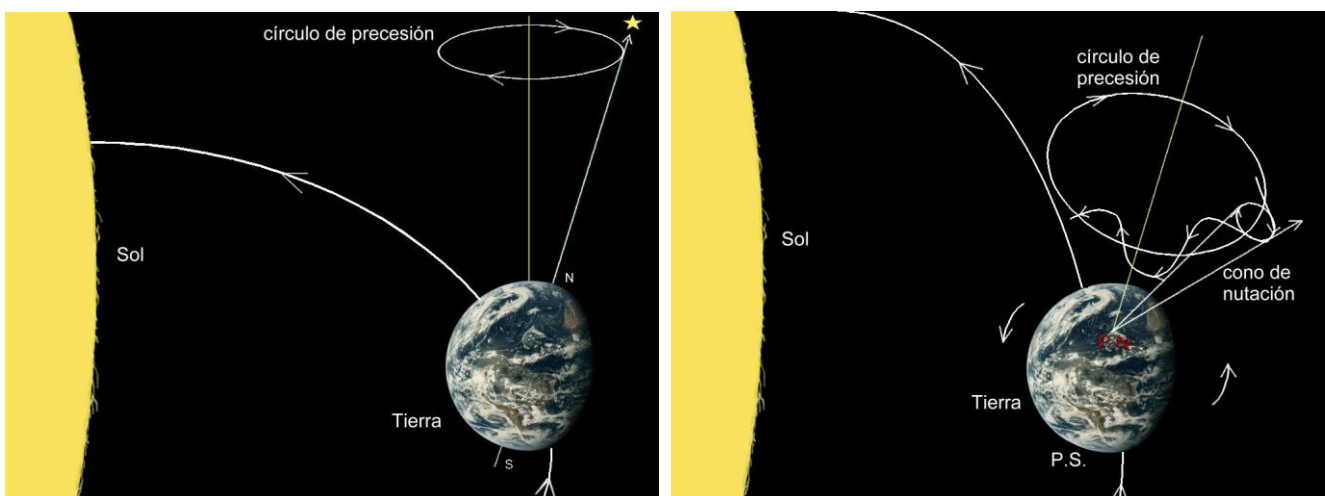
La segunda es su gran luminosidad cuando está entre las fases creciente y menguante, en especial durante la luna llena. Ese gran brillo nocturno afecta de manera muy importante a la fauna terrestre incluido el Hombre, y en general a casi todos los seres vivos. Por ejemplo, se le atribuye a la Luna una relación directa con las bestias antropomorfas, como los licántropos y otros seres míticos, y por supuesto a los lobos y otros animales del bosque, otorgándosele también un carácter esotérico en aquelarres y otros ceremoniales sagrados, o ritos mágicos, en las noches de luna llena.

La tercera es su periodo de rotación síncrona de 28 días que hace que solamente veamos un mismo hemisferio y que coincida con el periodo menstrual femenino, hecho que en casi todas las culturas ha vinculado nuestro satélite con divinidades de carácter femenino y con todo lo relacionado con el mismo, como la fertilidad, la maternidad, el embarazo, la procreación y el amor...

Todas las civilizaciones humanas, en todo tiempo y lugar, han considerado a la Luna como una divinidad relacionada con el tiempo, el devenir y el destino. La Luna mientras crecía y decrecía, desaparecía y reaparecía, simbolizaba el nacimiento y la muerte, incluso la resurrección y la idea adoptada por muchas religiones de que con la muerte no se acaba todo. También se ha considerado a la Luna dominadora de las aguas y señora de la vegetación, al observar el sube y baja de los mares y relacionarlo con el ritmo lunar (antes de conocer el fenómeno de las mareas y su origen).

Existen algunos grupos humanos como por ejemplo los pigmeos centroafricanos en los que a la Luna se la considera la madre de la vegetación y de las cosas vivas. Las mujeres de esta tribu, en un ceremonial que tiene lugar antes de la época de lluvias, se untan con jugos vegetales y arcilla creando una especie de mascarilla blanca como la luz lunar, para después ingerir una bebida alcohólica a base de plátanos fermentados y entrar en una especie de trance, danzando y bailando hasta el límite de sus fuerzas, suplicando e invocando a la Luna que aleje a los malos espíritus y que proporcione a la comunidad niños y alimentos en abundancia.

En ausencia de la Luna, el día terrestre duraría mucho menos de 24 horas, y posiblemente no existirían las cuatro estaciones, primavera, verano, otoño e invierno. El eje de rotación de la Tierra sufre un 'bamboleo' como si fuera una peonza, la presencia de la Luna y del Sol contribuyen a ese movimiento retrógrado (en el sentido de las agujas del reloj visto desde el polo norte) denominado '*precesión*'. Superponiéndose a este movimiento que tiene un periodo de unos 25.767 años existe otro denominado '*nutación*', causado sobre todo por la acción gravitatoria de la Luna y que tiene un periodo de unos 18,6 años. Estos dos movimientos combinados hacen que el polo norte celeste describa una línea sinusoidal que en el momento presente apunta a las cercanías de la estrella '*Polaris*', nuestra estrella polar actual, que dejará de serlo poco a poco según pasen los años (Figuras 51 y 52). Igualmente, el movimiento de precesión provoca que los equinoccios, que son los puntos de corte entre la eclíptica y el ecuador celeste, recorran el cielo en esos 25.767 años mencionados (fenómeno denominado '*precesión de los equinoccios*'), pasando de una constelación del zodiaco a otra cada 2150 años aproximadamente ( $2150 \times 12 = 25.800$  años), dando lugar a lo que en algunos ámbitos relacionados con la Astrología se denominan '*eras*', en cuyo contexto se dice que a mediados del siglo XX dio comienzo la '*Era de Acuario*'.



Figuras 51 y 52: Movimientos de precesión y nutación.  
Imagen: Julio Solís García

## CONCLUSIONES

*"La luna asombra mi vida como si fuera una ilusión"*  
Juan Ramón Jiménez (1881-1958)



*Figuras 53: Terminador lunar plagado de Cráteres, mares y cordilleras. -NASA-*

Después de 4000 millones de años la Luna nos mira impasible, testigo mudo de la aparición de la vida en la Tierra, de su desarrollo, de sus vertiginosos momentos de explosión de vida y de sus extinciones, de las glaciaciones, de los periodos cálidos, del nacimiento y desaparición de los dinosaurios y de la irrupción del ser humano que se ha ido extendiendo por el planeta, arrasando por donde pasa y contaminando la atmósfera y los océanos.

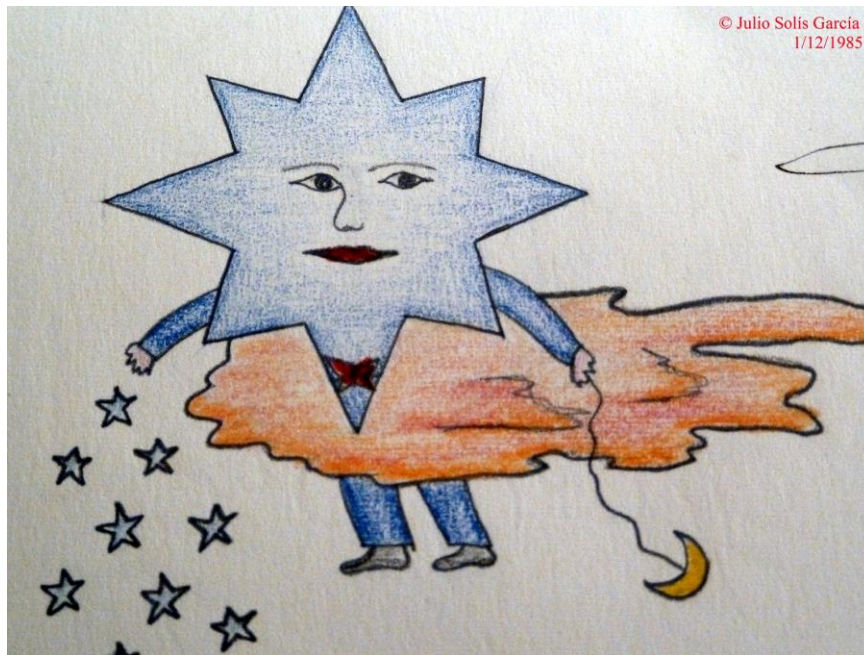
Ha contemplado con indiferencia nuestras guerras, conflictos, miserias y grandezas, y ha visto cómo hemos creado infraestructuras, carretas, puentes, ciudades.... incluso cómo nos hemos embutido en unos trajes especiales (y espaciales), para protegernos de nuestra tremenda fragilidad, y salir al espacio fuera de nuestro maltratado planeta, incluso para poner el pie en su grisácea superficie.

Ahora la Luna nos muestra dos aspectos completamente distintos, de manera análoga a sus dos caras. Uno sigue perteneciendo al reino de la magia y la superstición, como en nuestros orígenes, rodeado de misterio y donde muchas personas quieren encontrar respuestas a sus preguntas más profundas, e incluso más mundanas... trabajo, dinero, amistades o amor, que la astrología pretende ofrecer en las páginas de periódicos y revistas, o en gabinetes de astrólogos de todo tipo y en todos los medios de comunicación, dando apariencia de profesionalidad.

Por otro lado, la Luna ya tiene asignado un papel en el desarrollo científico-tecnológico del ser humano. Con la puesta en marcha del proyecto espacial internacional 'Artemis', la Luna se convertirá en una fuente de recursos minerales, en un objetivo comercial y también turístico al más alto nivel, donde las mayores fortunas podrán permitirse viajes a nuestro satélite como el que visita otros lugares de la Tierra, con el mero propósito de contemplar nuestro planeta desde el espacio, o experimentar lo que significa caminar por la Luna y disfrutar de su inhóspita belleza, y por último en una plataforma intermedia para la exploración del resto del Sistema Solar con bases permanentes que faciliten las expediciones a Marte y a otros lugares aún más lejanos.

La Luna, nuestra compañera constante, ha impulsado avances tecnológicos y científicos, y ahora será el laboratorio perfecto para ayudar a los seres humanos a practicar cómo viajar, vivir y tra-

bajar en el espacio profundo. Al mismo tiempo, los científicos continúan desvelando los misterios que guarda la Luna mientras alumbra la próxima era de la exploración espacial (Figura 54).



*Figuras 54: Una estrella paseando a la Luna por el cielo estrellado. Imagen: Julio Solís García*



## REFERENCIAS Y CONSULTAS

- *Anuario del Real Observatorio Astronómico 2023 - Instituto Geográfico Nacional - 2023*
- *Astronáutica Soviética - Félix Llaugé - Ediciones Picazo - 1972*
- *COSMOS (Cronología general de la Astronáutica) - Andreas Faber Kaiser - Asesoría Técnica de Ediciones - 1973*
- *LA LUNA, una misteriosa nave espacial - Don Wilson - Editorial Pomaire, S.A. - 1978*
- *Los Planetas - David McNab y James Younger - Gedisa Editorial S.A. - 1999*
- <https://astronomia.ign.es/eclipses-de-sol-y-luna>
- <https://www.geoenciclopedia.com/luna/>
- <https://www.sea-astronomia.es/glosario/luna>
- <https://ciencia.nasa.gov/la-luna-un-faro-para-la-exploracion-espacial>
- <https://solarsystem.nasa.gov/moons/mars-moons/in-depth/>
- <https://www.astrobatocora.com/la-tierra-pudo-ser-una-sinestia/>
- <https://www.muyinteresante.es/naturaleza/articulo/afectan-las-fases-de-la-luna-a-los-seres-vivos-441658212183>
- <https://www.qtorb.com/2022/01/la-luna-y-su-valor-estrategico-para-la-humanidad.html>
- <https://www.nationalgeographic.es/espacio/2019/07/por-que-tenemos-la-luna-y-como-afecta-nuestro-planeta>
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Luna>
- <https://www.infobae.com/america/ciencia-america/2022/10/26/como-se-formo-la-luna-las-cinco-teorias-mas-firmes-sobre-su-origen/>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Origen\\_de\\_la\\_Luna](https://es.wikipedia.org/wiki/Origen_de_la_Luna)
- <https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/apolo-11-770/el-origen-de-la-luna-17627>
- <https://www.ngenespanol.com/el-espacio/cual-es-el-origen-de-la-luna-resumen/>
- <http://www.geodiversidad.es/sistema-solar/la-luna-origen-evolucion-y-geodiversidad>
- <https://www.astrobatocora.com/la-tierra-pudo-ser-una-sinestia/>
- <https://www.muyinteresante.es/ciencia/articulo/sinestia-un-nuevo-tipo-de-planeta-601495626231>
- <https://solarsystem.nasa.gov/moons/mars-moons/in-depth/>
- [https://www.wikiwand.com/es/Estructura\\_interna\\_de\\_la\\_Luna](https://www.wikiwand.com/es/Estructura_interna_de_la_Luna)
- <https://www.bbc.com/mundo/noticias-48216489>

- <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46133510>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Geolog%C3%ADa\\_de\\_la\\_Luna](https://es.wikipedia.org/wiki/Geolog%C3%ADa_de_la_Luna)
- [http://enciclopedia.us.es/index.php/Geolog%C3%ADa\\_de\\_la\\_Luna](http://enciclopedia.us.es/index.php/Geolog%C3%ADa_de_la_Luna)
- <https://notibomba.com/la-luna-una-nave-espacial-cientificos-rusos-no-descartan-esta-teoria/>
- *Los cielos de los planetas y satélites del Sistema Solar - Revista Digital ACTA nº 32*  
[https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/032001.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/032001.pdf)
- *Climatología del inframundo - Revista Digital de ACTA nº 42*  
[https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/042001.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/042001.pdf)

(Para comentarios y observaciones al autor: [caronte@acta.es](mailto:caronte@acta.es))