



# 10

# El Sistema Solar

- 10.1 El Sol
- 10.2 Dos grandes grupos
- 10.3 Los planetas terrestres
- 10.4 Asteroides
- 10.5 Los planetas gigantes
- 10.6 Otros cuerpos menores
- 10.7 Trabajos escolares

*Hay posiblemente varias razones para la popularidad actual de los temas relacionados con el Sistema Solar. Por ejemplo, la gran difusión de la ciencia-ficción excita nuestra curiosidad hacia los mundos exóticos que descubren las sondas planetarias. Desde otra perspectiva, muchos ven en esta exploración un campo donde poner a prueba de forma pacífica tecnología punta, como grandes cohetes, que de otra forma parecen sólo destinados a la carrera de armamentos. Otros más ven en el Sistema Solar la nueva frontera que Homo Sapiens, como especie dominante en este planeta, está condenado a explorar. Por último, los resultados son una razón de peso: unos presupuestos moderados de sólo dos naciones de la Tierra han conseguido unos avances científicos espectaculares.*

Francisco Anguita, *Geología planetaria*

Hasta ahora hemos podido presentar primero lo que se observa, lo que podemos ver en el cielo, las apariencias, que no requieren ni telescopio ni equipo especial, solo constancia y atención (y cielos despejados, claro). El siguiente paso, intentando seguir de la mejor manera posible una forma de trabajar “científica”, ha sido ordenar, clasificar, estructurar ese cúmulo aparentemente desorganizado de datos que nos proporciona la vista del cielo. Y, por último, hemos dado el paso final que es proponer un modelo teórico (el ejemplo paradigmático es el de las dos esferas, aunque no le va a la zaga el sistema heliocéntrico) dentro del cual tienen cabida, cobran sentido y resultan satisfactoria y coherentemente explicados todos esos fenómenos observados.

El hacerlo así es uno de los pilares de este curso y ha sido elegido deliberadamente, en esencia por motivos pedagógicos: buscamos la comprensión y no la memorización; no nos interesan tanto los datos numéricos exactos ni llegar a un resultado de forma mecánica, pero desprovista de sentido, aplicando sin más el procedimiento que nos han dicho, cuanto el placer de ver cómo todo encaja, cómo los hechos se van acomodando en un esquema sencillo que consigue explicarlos.

Pues bien, este *leitmotiv*, este eje director, se quiebra a partir de este tema. Las cuestiones que tenemos que abordar de ahora en adelante (masa, densidad, composición química, reacciones nucleares, evolución estelar, cosmología, etc.) ya no aceptan una aproximación intuitiva; tenemos que fiarnos de los datos recogidos por telescopios o por sondas espaciales con tecnología muy avanzada que analizan, no solo lo que se ve, sino otro tipo de información que nos llega a través de ondas electromagnéticas distintas de las de la luz visible. Y también tenemos que confiar ciegamente en los razonamientos de los expertos teóricos que manejan herramientas matemáticas, físicas, químicas, geológicas y biológicas de altos vuelos y que han ido forjando a lo largo de los dos últimos siglos el *corpus* de conocimientos que aquí pretendemos resumir.

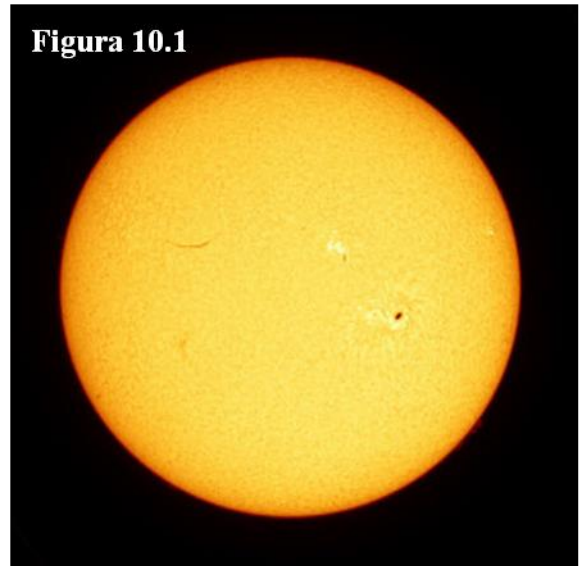
## 10.1 EL SOL

Es el objeto central y más importante de nuestro sistema planetario. Su gravedad mantiene en órbita a los planetas, asteroides, planetas enanos, cometas y demás objetos. Irradia al espacio un enorme torrente de energía que calienta e ilumina todo a su alrededor: la vida en la Tierra depende completamente de su luz y su calor. No es extraño que la mayoría de las primitivas civilizaciones humanas le otorgaran la categoría de dios, a menudo el primero y más importante de todos.

Ya sabes que nunca debes mirarlo directamente pues su radiación es muy potente y puede dañar seriamente la vista. Hay que hacerlo con las debidas protecciones (por proyección, con un filtro de soldador, o mejor, con filtros especialmente diseñados para ello). Llevados por la curiosidad, siempre se intentó, precisamente eso, observarlo a ver qué se descubría en él. Lo primero que llamó la atención cuando se empezó a utilizar el telescopio (Galileo Galilei, 1609) fueron las **manchas**.

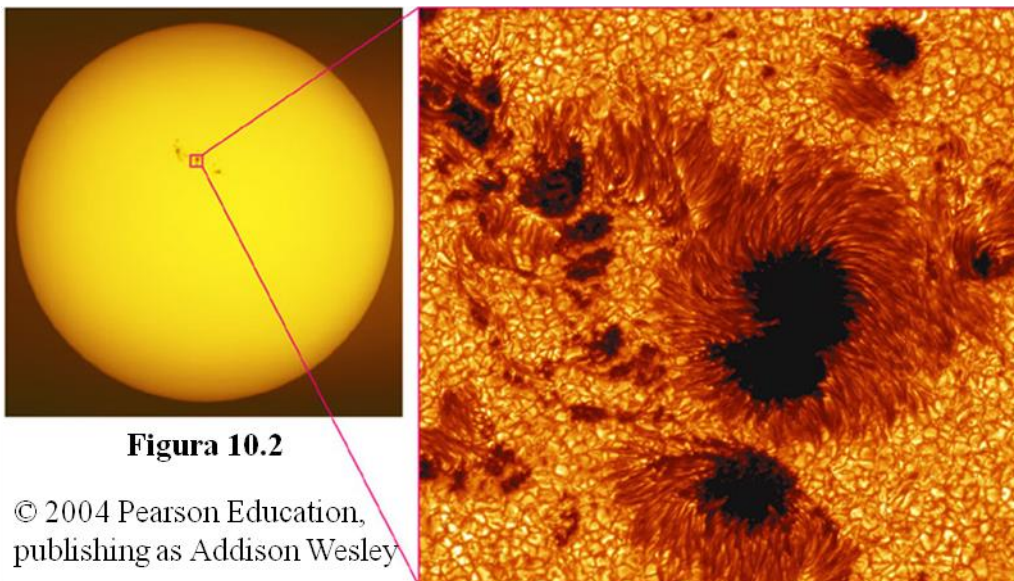
Se esperaba un disco brillante y uniforme, pero a menudo aparecían unos puntos negros. Estas manchas no permanecen fijas: surgen en un momento dado, se desplazan y luego, poco a poco, se difuminan dando paso a otras nuevas. En ciertas épocas hay un buen número de ellas y en otras no se ve prácticamente ninguna.

Una inspección más detallada permite apreciar que las manchas tienen un centro muy oscuro rodeado de unos filamentos que parecen salir de él y curvarse a medida que se alejan. También, en la fotografía, podemos ver que la “superficie” del Sol no es lisa y continua, sino que está formada por pequeñas “celdas”: es la **granulación** solar.



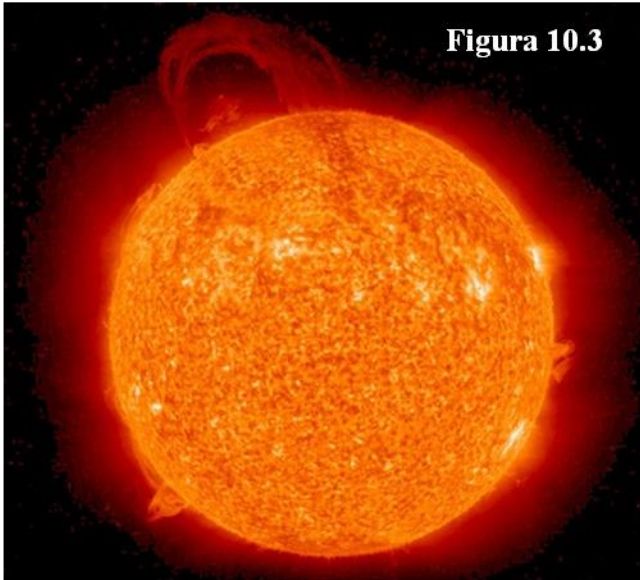
**Figura 10.1**

[https://tecnoticias.net/wp-content/uploads/2019/09/190919095224\\_1\\_540x360.jpg](https://tecnoticias.net/wp-content/uploads/2019/09/190919095224_1_540x360.jpg)



**Figura 10.2**

© 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley



<https://www.granuniverso.com/wp-content/uploads/2011/02/111.jpg>

Hemos entrecomillado la palabra “superficie” porque no es del todo correcta: el Sol no es un objeto sólido, como la Tierra, sino una esfera gaseosa. Esa capa donde se sitúan las manchas y de la que emerge hacia el exterior la radiación se llama **fotosfera** (esfera de luz).

Por encima de ella también se observan algunos fenómenos muy llamativos: protuberancias, fulguraciones y erupciones, que son como llamaradas inmensas que escapan hacia fuera. Parece todo lleno de hilos flameantes que saltan al espacio, algunos “pequeños” y otros de gran tamaño. Toda esta capa, ligeramente externa a la fotosfera, se ha llamado **cromosfera** (esfera de color).



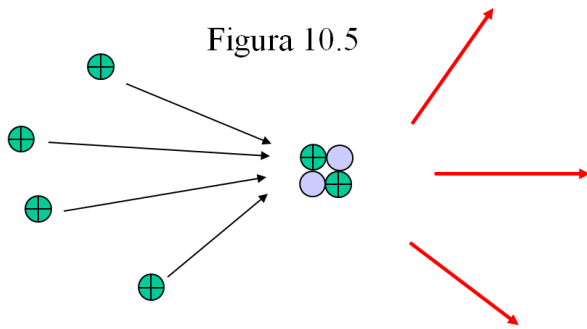
**Figura 10.4**

<https://eclipse2024.org/images/xavier/3.jpg>

En los eclipses totales es posible ver, incluso a simple vista, un espectáculo inolvidable: el disco negro de la Luna que oculta completamente a nuestra estrella aparece rodeado de un halo luminoso bastante extenso y de color blanquecino. Es la **corona** solar, su capa más externa.

Todos estos indicios apuntan a algo así como una bola incandescente, en ebullición, parece como si hubiera un fuego interno que pugna por salir y lo hace de forma desordenada, con estallidos violentos. ¿Cuál es el origen de esa energía interna? ¿De qué sustancias está formado? ¿Cuál es su temperatura? Solo a mediados del siglo XX comenzó a comprenderse, gracias a los conocimientos que se tenían sobre las partículas elementales y las fuerzas que las mantienen unidas en el núcleo atómico.

El Sol es una enorme esfera gaseosa de unos 700.000 km de radio formada esencialmente por hidrógeno (H, 70%) y helio (He, 29%) los dos primeros elementos de la tabla periódica y los más ligeros de todos. El peso de las capas superiores hace que la presión de estos gases aumente con la profundidad y así resulta una densidad media  $d = 1,4 \text{ g/cm}^3$ , algo mayor que la del agua.

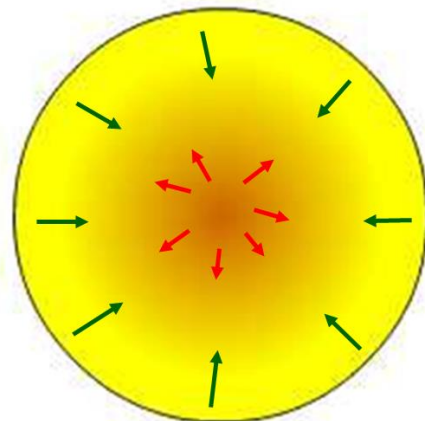


En el núcleo del Sol el hidrógeno y el helio están tan comprimidos que la densidad allí es de  $160 \text{ g/cm}^3$ . La temperatura es tremenda: 15 millones de grados. No hay átomos de H completos, con su electrón, pues en esas condiciones de presión y temperatura solo pueden existir los núcleos, es decir, protones, que están muy próximos y se agitan con gran energía: chocan entre sí con mucha frecuencia y se producen reacciones de fusión nuclear en las que el H se convierte en He: cuatro protones se unen para formar un núcleo de He (dos protones y dos neutrones). En realidad, el proceso es bastante más complejo (ver tema 15), pero el resultado global es ese. Este núcleo de He tiene una masa ligeramente menor que los cuatro protones iniciales y toda esa masa “perdida” se convierte (según la famosa ecuación de Einstein  $E = m c^2$ ) en una gran cantidad de energía que queda libre: son los fotones, partículas elementales que transportan la energía, la luz y el calor.

El interior del Sol es un reactor nuclear de fusión. Cada segundo unas 400 toneladas de H se transforman en He desprendiéndose esa ingente cantidad de energía que constituye la fuente de la luz y el calor solar. A pesar de ese ritmo que nos puede parecer frenético y loco, el Sol es tan grande que lleva así unos 5.000 millones de años y, según parece, le queda cuerda para otro tanto.

En él, como en todas las estrellas, se produce un equilibrio entre dos fuerzas opuestas (figura 10.6). Por una parte, la gravedad empuja hacia abajo, hacia el centro, a todas las capas superiores. Los fotones producidos en el núcleo, por su parte, tienden a “subir”, a escapar, y empujan hacia fuera conteniendo la caída gravitatoria de las capas externas: es la presión de radiación.

Figura 10.6



En él, como en todas las estrellas, se produce un equilibrio entre dos fuerzas opuestas (figura 10.6). Por una parte, la gravedad empuja hacia abajo, hacia el centro, a todas las capas superiores. Los fotones producidos en el núcleo, por su parte, tienden a “subir”, a escapar, y empujan hacia fuera conteniendo la caída gravitatoria de las capas externas: es la presión de radiación.



La energía producida en el núcleo tiene que atravesar todo el espesor del Sol. La primera parte de este viaje es muy lenta: los fotones de alta energía producidos en el interior profundo van siendo absorbidos por los núcleos atómicos con los que se encuentran y reemitidos casi inmediatamente, perdiendo parte de su energía. Tardan un millón de años en atravesar la zona radiativa en la que la energía se va transmitiendo así sin que haya movimiento de masas.

En cambio, más lejos, hay otra capa, la zona convectiva, en la que el flujo energético consiste en que masas más calientes se desplacen hacia arriba y las menos calientes desciendan, formándose remolinos (células convectivas).

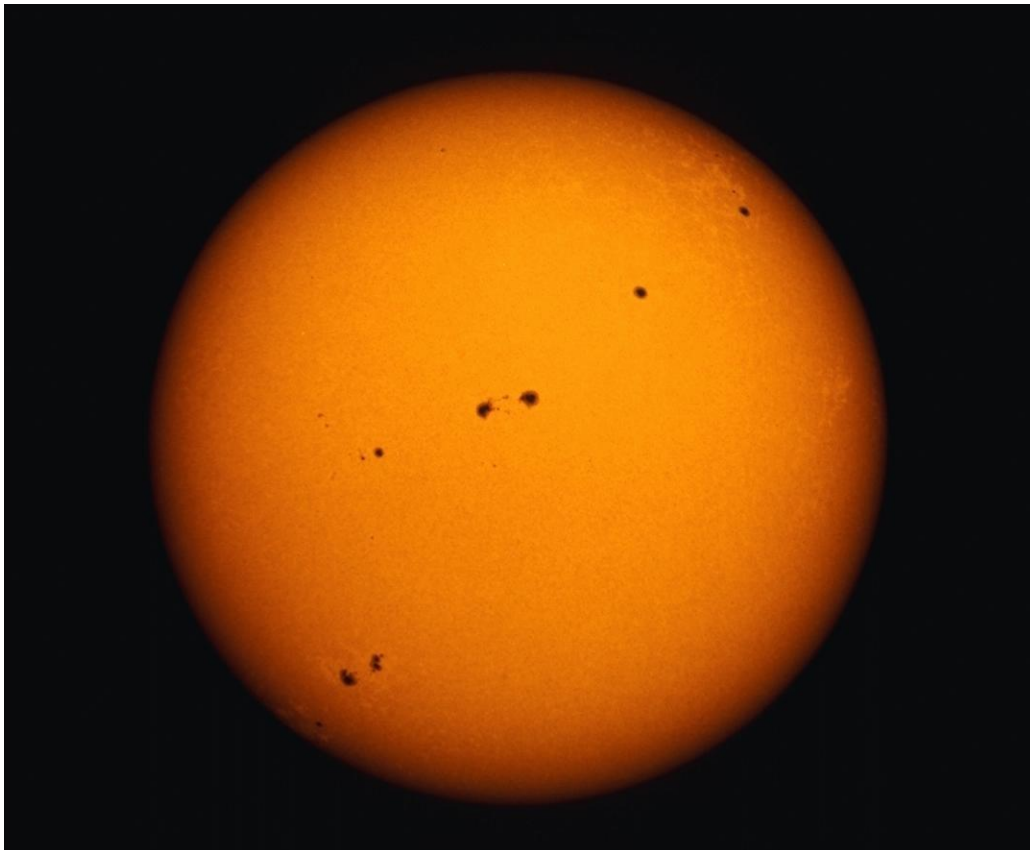
Finalmente, los fotones son liberados al exterior en la fotosfera, que está a unos 5.800 K (el Kelvin es la unidad de temperatura en la escala absoluta:  $0\text{ K} = -273^\circ\text{ C}$ ; para estos valores tan grandes da prácticamente igual utilizar la escala Kelvin, más científica, o la más habitual, los grados Celsius o centígrados). El aspecto granuloso de la fotosfera parece deberse a tener debajo los remolinos convectivos.

Las manchas son zonas en las que la temperatura es algo más baja que en sus alrededores, debido a las pequeñas irregularidades en la transmisión de la energía que se producen a causa de los torbellinos convectivos. También las fuerzas magnéticas tienen su papel en la curvatura de los flecos que salen del centro de las manchas, así como en otros fenómenos espectaculares situados en la cromosfera: esos estallidos de material que escapa momentáneamente de la gravedad solar como las protuberancias y las fulguraciones.

Por encima de la cromosfera está la corona, en la que la densidad del material es cada vez menor. Sin embargo, la temperatura es muy alta (del orden de  $10^6\text{ K}$ ) y el H se rompe en protones y electrones que salen del Sol a gran velocidad, formando el viento solar.

### *Ejercicio 10.1*

*En la fotografía se aprecian algunas manchas solares. Mide con una regla el radio del Sol en la fotografía y el tamaño de alguna mancha. Calcula el tamaño real de esa mancha (recuerda cuál es el radio real del Sol: 700.000 km). Compara el tamaño de la mancha con la Tierra.*



*Haz clic [aquí](#) para ver la solución.*

## 10.2 DOS GRANDES GRUPOS

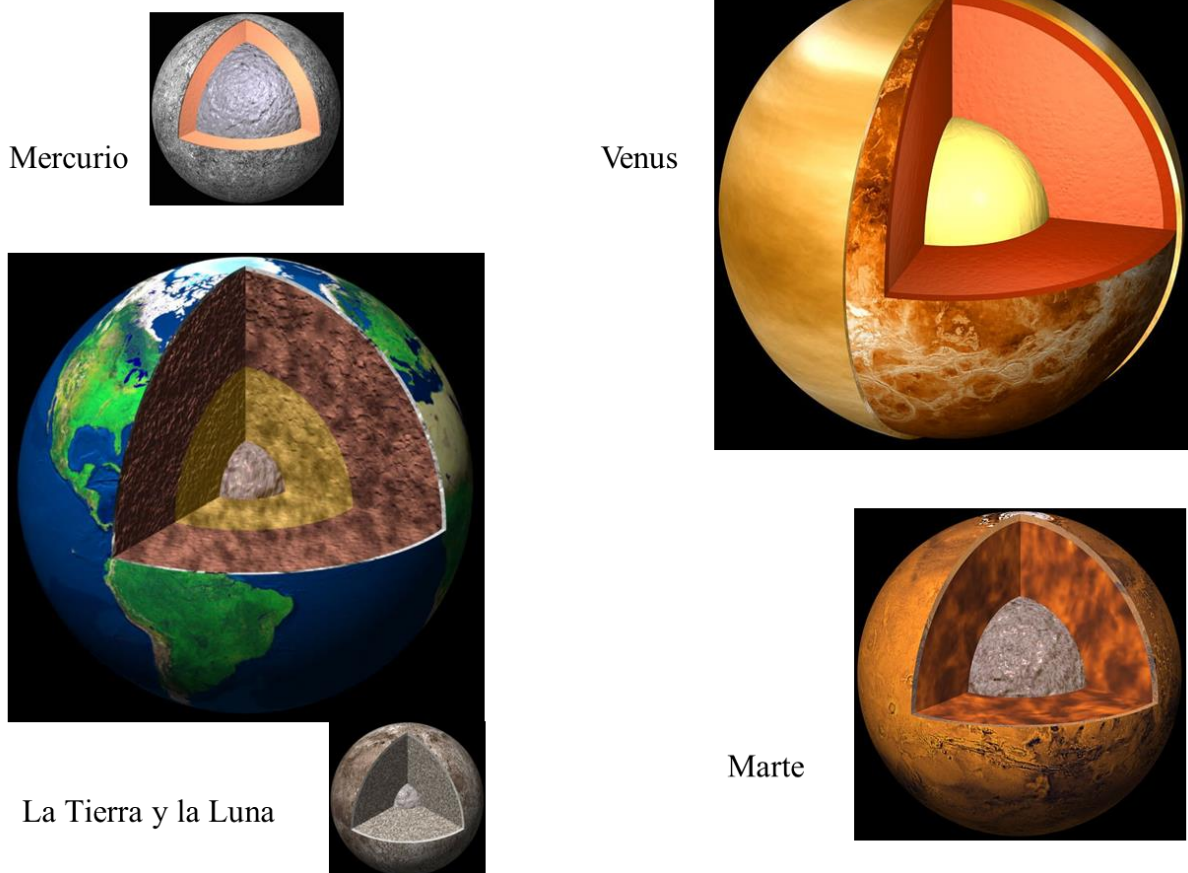
Todos los planetas del sistema solar son básicamente esféricos y tienen una estructura interna como la de la Tierra (núcleo, manto, en algunos casos corteza y, por último, atmósfera). Pero se dividen en dos grupos claramente diferenciados: los terrestres o interiores (sólidos y rocosos, desde Mercurio hasta Marte) y los gigantes o exteriores (gaseosos/líquidos, Júpiter – Neptuno).

Los cuatro del primer grupo tienen un tamaño pequeño, núcleo metálico (hierro Fe y níquel Ni), un manto rocoso, una corteza sólida también formada por rocas (silicatos en general y en especial basalto), y una atmósfera gaseosa. Su componente principal son las rocas y así su densidad está en torno a  $4 \text{ g/cm}^3$ .

Figura 10.8

<https://www.astromia.com/fotosolar/interiortierra.htm>

### Los cuerpos planetarios terrestres

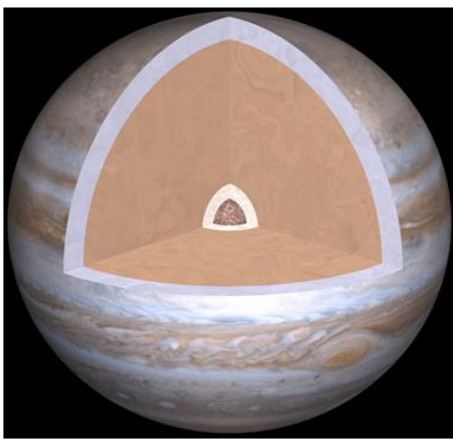


En cambio, los planetas gigantes tienen gran tamaño, un núcleo interno rocoso y un núcleo externo de hielos de agua, metano y amoníaco. El resto está formado esencialmente de hidrógeno y helio (¡como el Sol!) que son sus componentes más importantes, por lo que su densidad es bastante menor que en los planetas rocosos. En el manto interno la presión hace que el H, el He y los hielos se comporten como líquidos, mientras que en el externo y en la atmósfera son gases.

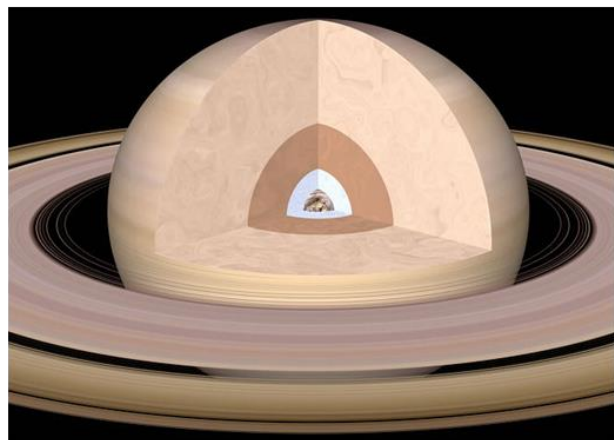
Figura 10.9

<https://www.astromia.com/fotosolar/interiorjupiter.htm>

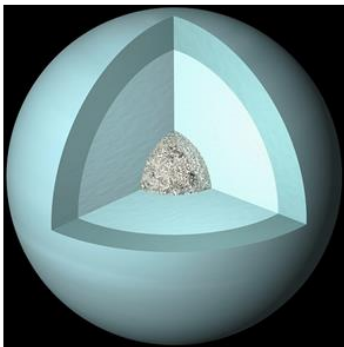
## Los gigantes líquidos



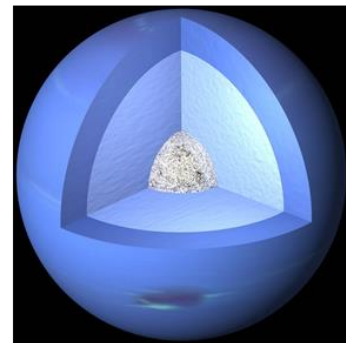
Júpiter



Saturno



Urano



Neptuno

Incluso con los mejores telescopios convencionales apenas se pudo obtener información detallada de los planetas. Sin embargo, desde el último cuarto del siglo XX las sondas espaciales han permitido conocer mucho mejor las características de nuestros hermanos.



## 10.3 LOS PLANETAS TERRESTRES

### *Mercurio*

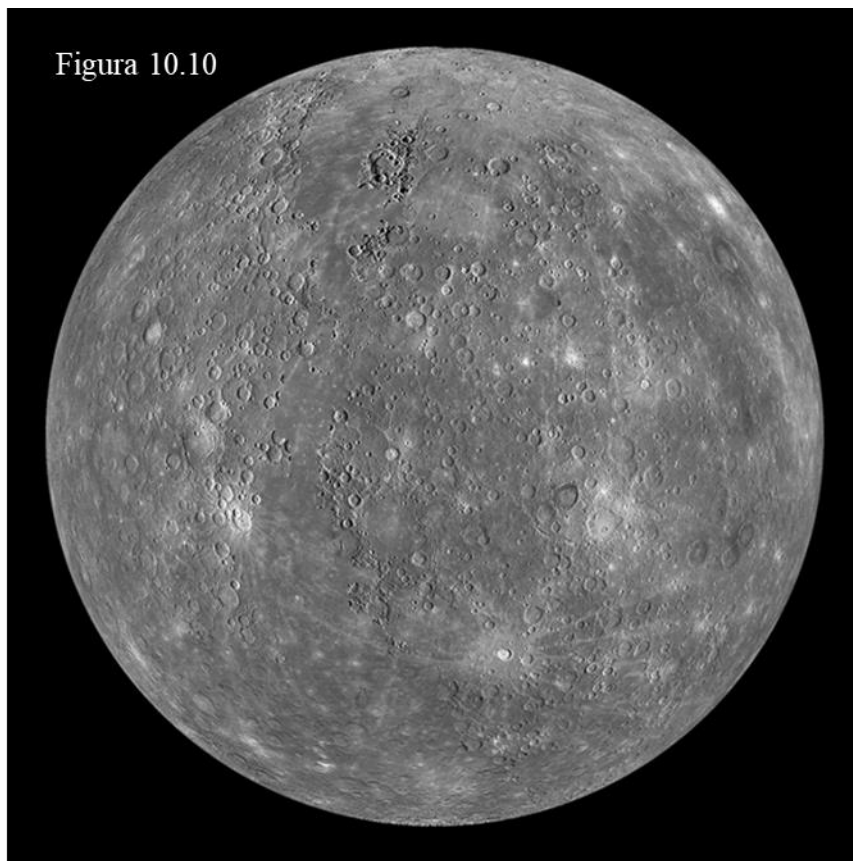


Figura 10.10

<https://www.geoenciclopedia.com/wp-content/uploads/2014/12/Mercurio.jpg>

Su superficie, fotografiada con detalle por la sonda Messenger entre 2011 y 2015 (figura 10.10), está repleta de cráteres de impacto. Una imagen suya puede confundirse con la Luna. El mayor de ellos es la cuenca Caloris (figura 10.11), con una serie de anillos concéntricos, pero no hay mares ni cráteres de gran tamaño.

Esto nos indica que Mercurio no tiene prácticamente nada de atmósfera que lo proteja de los pequeños cuerpos que caen hacia él, chocan con su superficie y producen esos cráteres. Lo cual es lógico porque es el menor de los planetas, su masa es reducida y, como consecuencia, su gravedad superficial (mucho menor que la terrestre) es insuficiente para retener a su alrededor los gases que, además, están muy calientes por su cercanía al Sol.

La presencia masiva de cráteres de impacto también permite deducir que el planeta no tiene erosión (pues no hay ni viento, ni lluvia) ni actividad geológica que pudiera borrarlos, no hay orogénias, ni levantamientos de nuevas montañas. Es decir que ya no tiene una temperatura interior suficiente como para que su manto rocoso sea fluido y provoque esos movimientos geológicos a gran escala. Lo cual también es debido a su pequeño tamaño porque los cuerpos menores se enfrían más rápido y así Mercurio ha disipado ya todo su calor de formación, el que se generó por las colisiones continuas que se produjeron en la gestación de cada uno de los planetas del sistema solar.

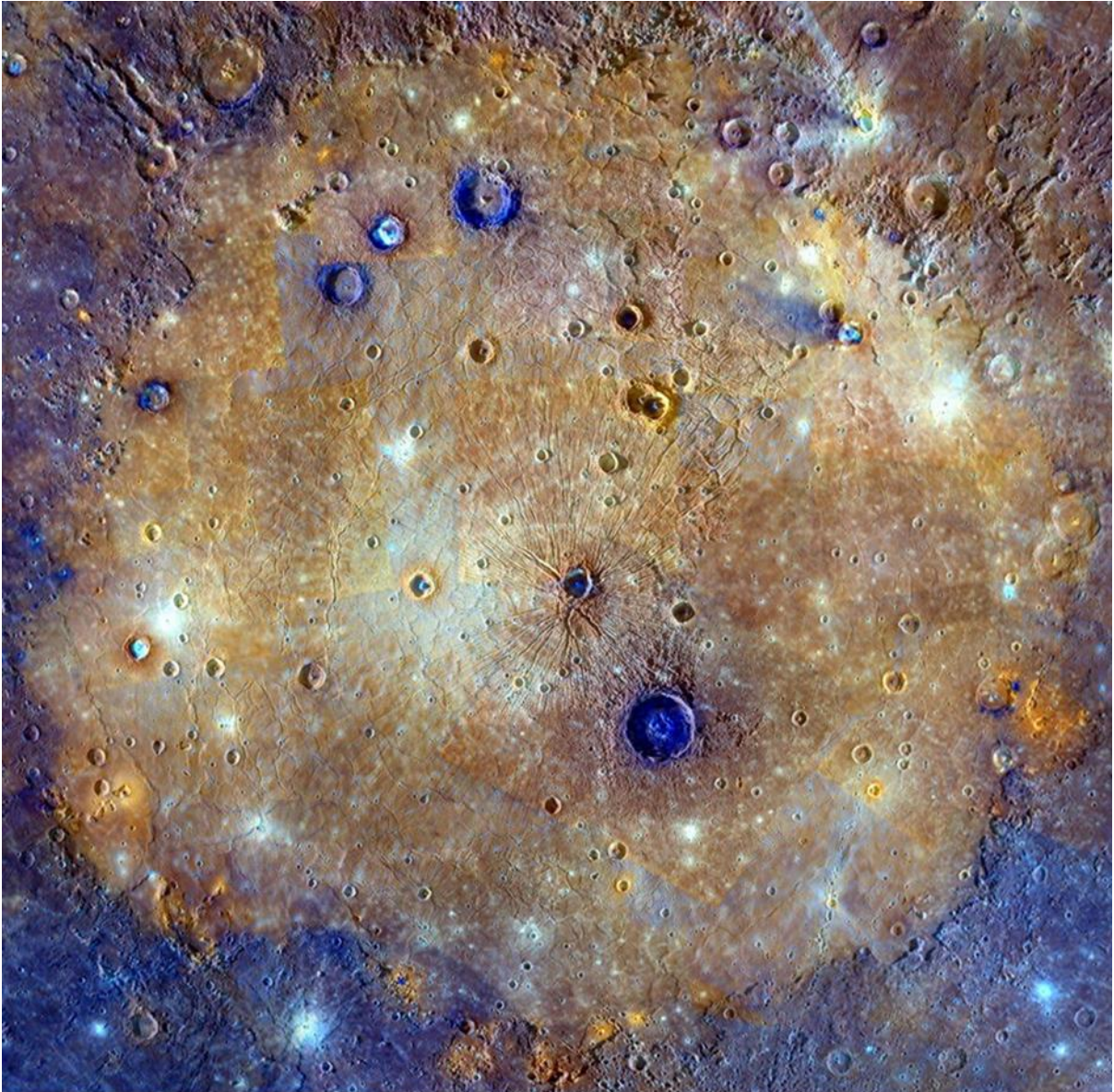


Figura 10.11 La cuenca Caloris, NASA, sonda Messenger

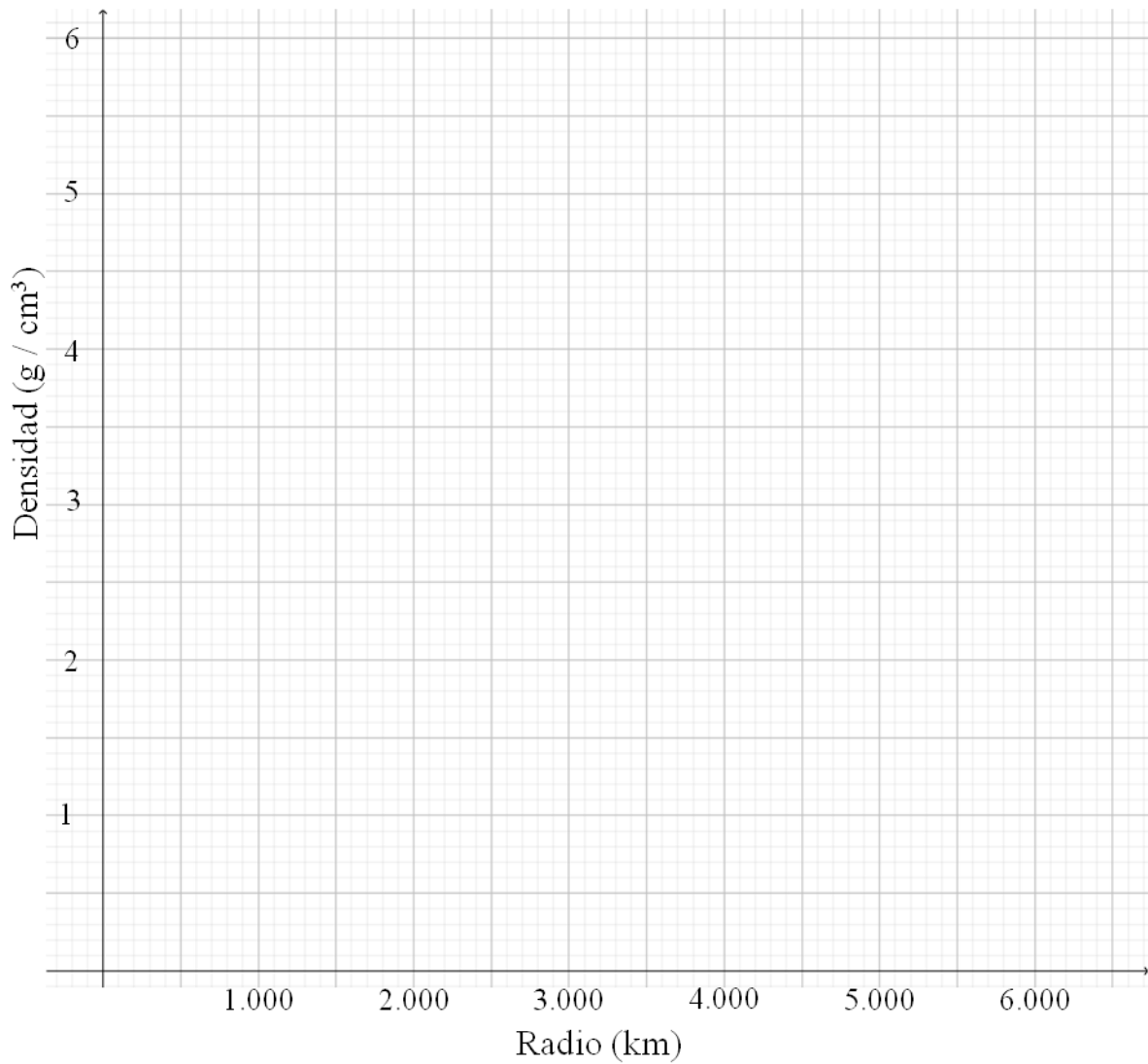
Otra característica destacada es la temperatura superficial: oscila brutalmente entre  $-180^{\circ}\text{C}$  y  $450^{\circ}\text{C}$ . Resulta que su periodo de rotación es lentísimo (tarda 59 días en completar un giro sobre su eje). Además, la combinación de esta rotación con la traslación ocasiona que su día solar dure casi 189 días terrestres. Por tanto, un punto cualquiera de su superficie pasa mucho tiempo seguido iluminado (y calentado) por el Sol, que además está muy próximo, con lo que alcanzará una alta temperatura. Ese mismo punto también tendrá una “noche” muy larga y, sin una atmósfera que ayude a distribuir el calor, se enfriará hasta esos tremendos  $-180^{\circ}\text{C}$ .

Su densidad es algo mayor de la esperada, lo que puede explicarse suponiendo que tiene un núcleo metálico algo más grande que los otros planetas rocosos.

Ejercicio 10.2

Sitúa en estos ejes los cuatro planetas interiores y la Luna, según su radio y su densidad. ¿Qué es lo que puedes deducir del gráfico?

	<i>Mercurio</i>	<i>Venus</i>	<i>Tierra</i>	<i>Marte</i>	<i>Luna</i>
<i>R (km)</i>	2.440	6.052	6.371	3.390	1.737
<i>d (g/cm<sup>3</sup>)</i>	5,43	5,24	5,5	3,9	3,34



Haz clic [aquí](#) para ver la solución.

## Venus



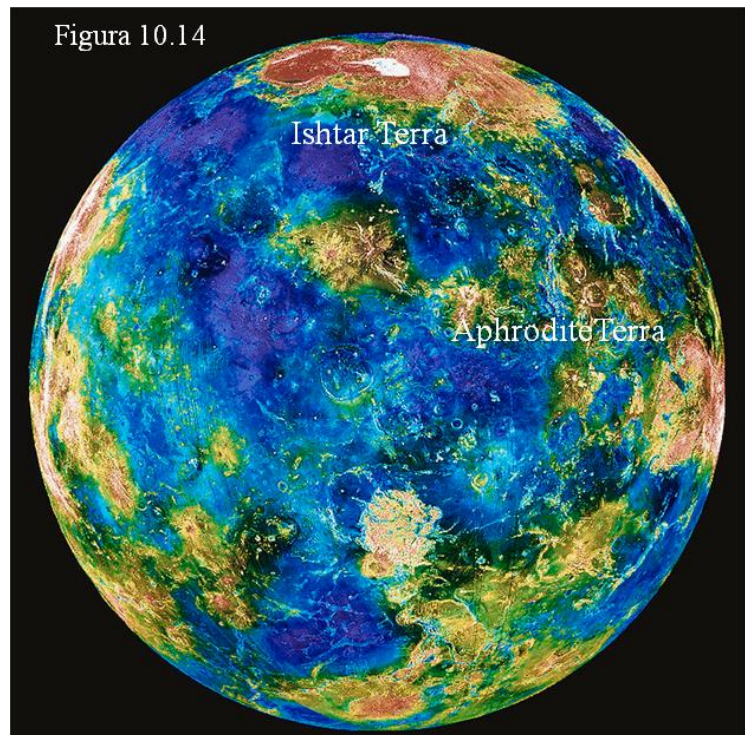
La densa atmósfera de dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>, (figura 10.12) sólo nos deja ver sus nubes (formadas por gotas de ácido sulfúrico) y provoca un intenso efecto invernadero de forma que la temperatura es bastante uniforme y ronda los 480°C (mayor que en Mercurio pese a estar más lejos). Dada la cercanía al Sol y la ausencia de un campo magnético protector, el viento solar debe expulsar parte de esa atmósfera que sería repuesta continuamente por el ligero vulcanismo remanente.

Las sondas Venera (1961 – 1984) fueron las primeras en posarse en su superficie y tomar fotos (figura 10.13).

La sonda Magallanes (1990 - 94) cartografió el planeta utilizando señales de radar (figuras 10.14 y 10.15). Su superficie es bastante plana, como una llanura de campos de lava (basalto) suavemente ondulada y, al parecer, formada toda ella al mismo tiempo en un episodio de feroz actividad volcánica hace unos 500 millones de años.

Las zonas más elevadas reciben el nombre de “continentes”, como Ishtar Terra (donde se encuentran las mayores alturas, los Montes Maxwell de 11.000 m) o Aphrodite Terra, aunque no hay agua líquida, desde luego, imposible con esas temperaturas.

Existen numerosos volcanes con alguna pequeña actividad residual,



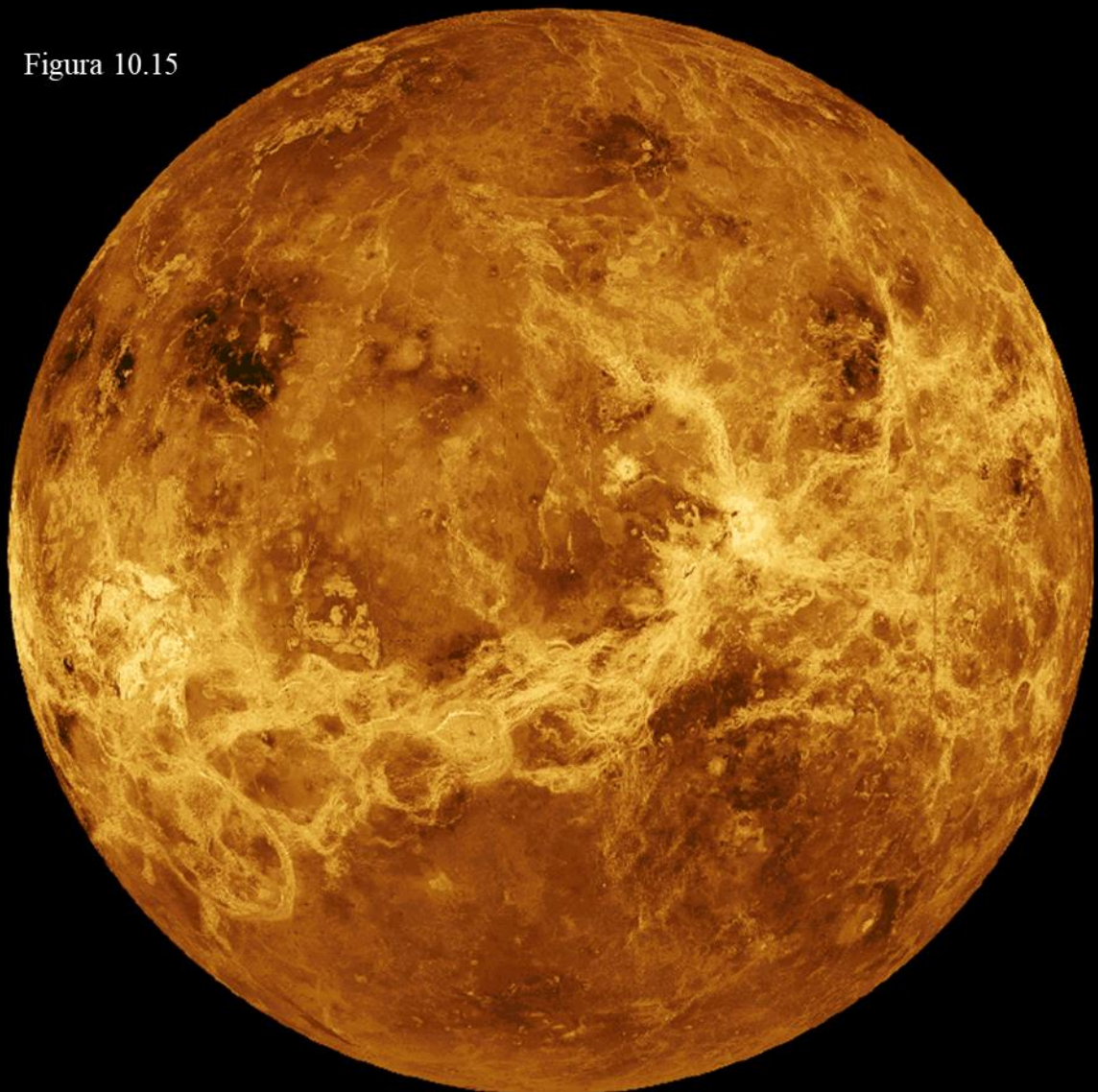
<https://images.fineartamerica.com/images-medium-large/venus-under-false-color-stocktrek.jpg>

pero no hay tectónica de placas como en la Tierra; en el manto sí hay corrientes de convección pero no llegan a fragmentar la corteza.

Hay unos 1.000 cráteres de impacto, mucho menos que en la Luna o Marte, debido sin duda a su densa atmósfera que lo protege de la caída de meteoritos y a la relativa juventud de la corteza. El mayor es el Mead (280 km de diámetro).

Tiene una rotación retrógrada (eje volteado) y muy lenta, lo que causa que el día solar sea menor que el sidéreo (116 y 243 días). Las hipótesis explicativas de este tipo de rotación son catastrofistas (impacto) o gradualistas (pequeños cambios acumulativos).

Figura 10.15

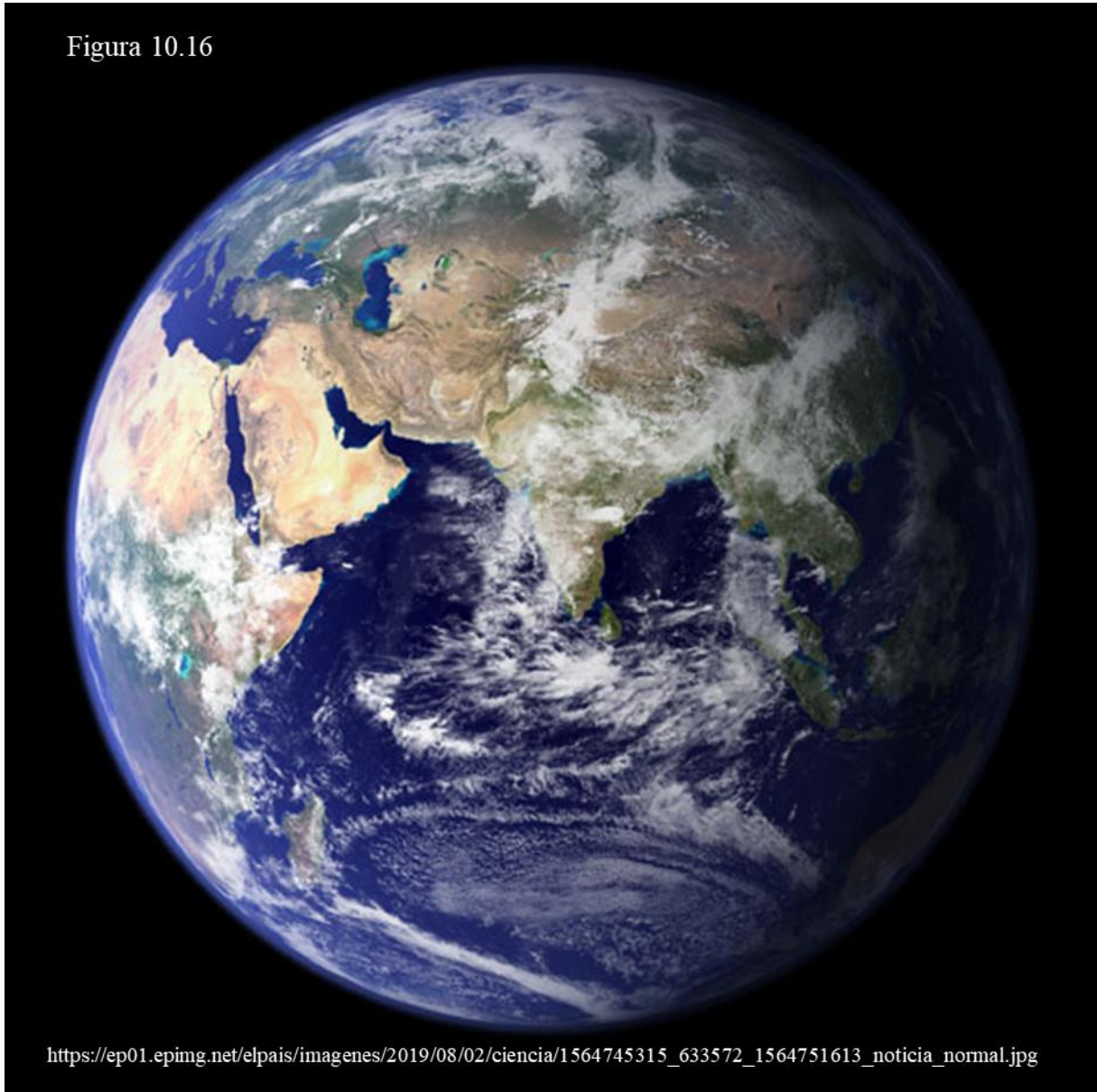


<https://cdn.thinglink.me/api/image/849997896248983554/1240/10/scaletowidth>

## La Tierra

El planeta azul presenta algunas peculiaridades: sus océanos de H<sub>2</sub>O, una atmósfera extraña, formada por nitrógeno (N<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>), gran actividad geológica y el hecho de ser el único en el que se ha desarrollado la vida inteligente.

Figura 10.16

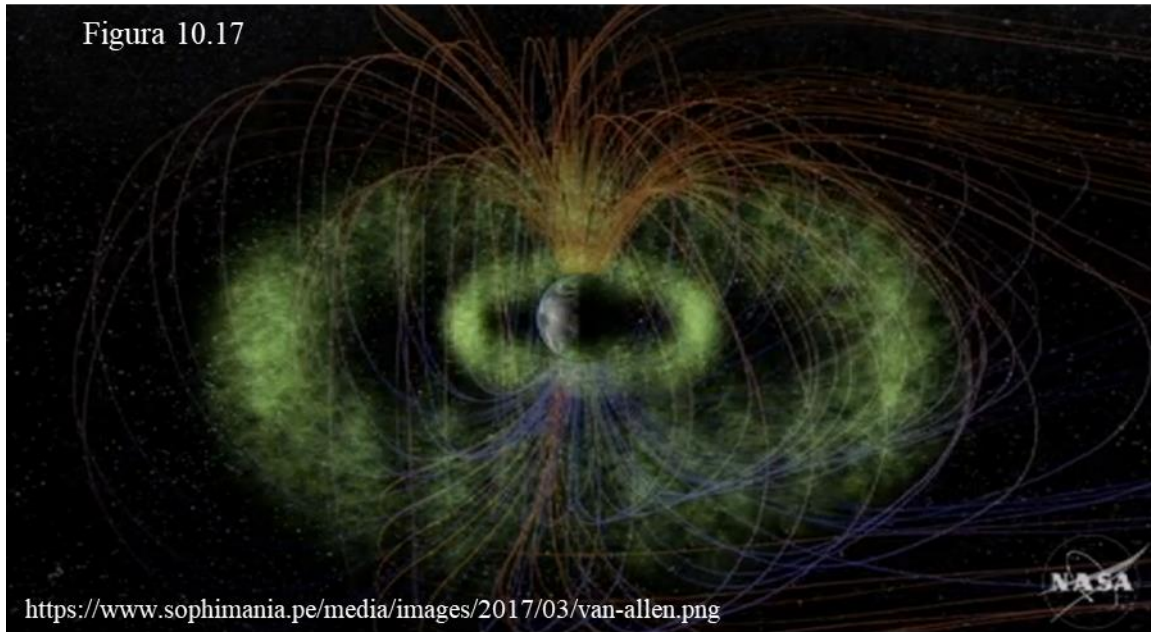


En su superficie destaca la presencia de una hidrosfera (agua en estado líquido) que se recicla continuamente (evaporación, lluvias, ríos). Las principales rocas de la corteza son el basalto (en la oceánica) y el granito (en la continental). Se han identificado unos 200 cráteres de impacto, un número muy razonable teniendo en cuenta la protección de la atmósfera, la erosión y la renovación de las rocas de la corteza.

La atmósfera contiene un 78% de N<sub>2</sub>, 21% de O<sub>2</sub> y algunos gases de invernadero (CO<sub>2</sub>, vapor de agua). Estos últimos permiten que la temperatura media sea de unos confortables 18°C. Una composición insólita, que solo se explica por la acción biológica. Es una atmósfera dinámica, que se recicla continuamente (el oxígeno es retirado por la respiración de los seres

vivos pero devuelto mediante la fotosíntesis; también el nitrógeno, el CO<sub>2</sub> y el agua tienen sus ciclos de consumo y reposición).

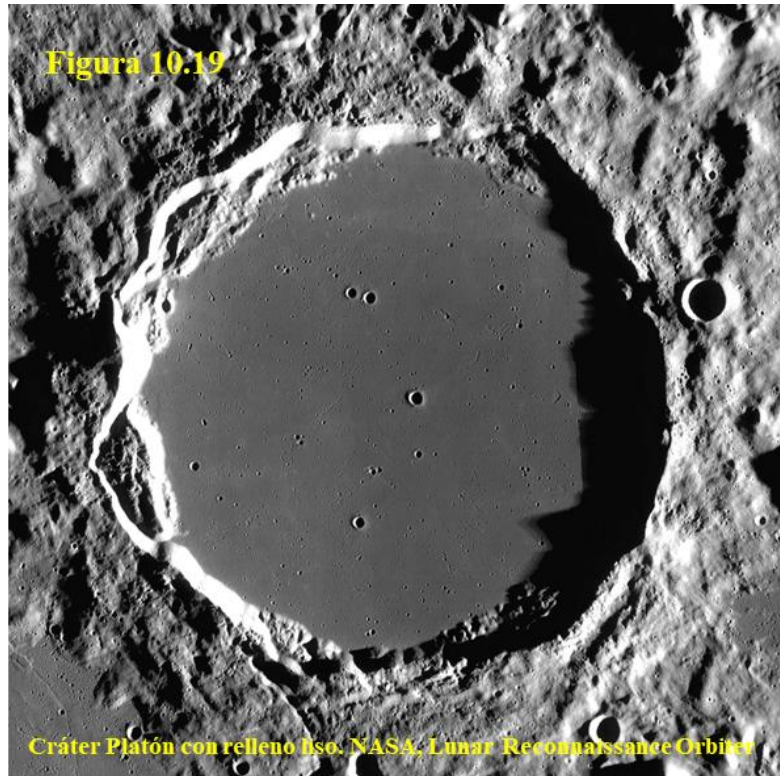
El núcleo interno es metálico y sólido, a unos 5.000 K, pero hay un núcleo externo, también metálico, fundido y con movimientos convectivos, que son la causa del campo magnético. Sus líneas de fuerza forman una especie de “donut” alrededor de la Tierra (figura 10.17) llamado cinturón de Van Allen que dirigen las partículas cargadas del viento solar hacia los polos, donde ionizan los gases atmosféricos provocando el llamativo fenómeno de las auroras polares (figura 10.18).



La gran temperatura interior, debida fundamentalmente al calor producido en la formación del planeta y que aún se conserva en buena medida dado su gran tamaño, es suficiente para calentar también el manto rocoso, fundir sus materiales y provocar en él corrientes convectivas que son la causa de la poderosa maquinaria de reciclado litosférico, única en todo el sistema: la tectónica de placas.

## La Luna

En la superficie de nuestro satélite se distinguen dos tipos de zonas: las tierras altas (de color muy claro y con muchos cráteres) y los *maria* (oscuros, menos cráteres, así llamados por su aparente parecido con los mares terrestres). En la cara oculta no hay casi *maria*.



Los cráteres (figura 10.19) son, desde luego, producto de impactos de meteoritos y los *maria* también son cuencas de impacto (producidas por objetos de gran tamaño) pero rellenas mucho después por basaltos muy fluidos (por eso el relleno horizontal, si hubieran sido más viscosos no serían tan llanos) con origen en el magma del manto lunar que alcanzó la superficie a través de fracturas.

Las rocas de la corteza son sobre todo brechas (pequeños fragmentos de roca unidos por un cemento): anortositas (silicatos con aluminio y calcio) en las tierras altas y basalto en los *maria*. Siempre se trata de rocas sin agua, deshidratadas. En la superficie estas rocas están pulverizadas por los numerosísimos microimpactos sufridos y forman como un polvo llamado **regolito**.

Dado su pequeño tamaño y, por tanto, su escasa gravedad (1/6 de la nuestra) carece totalmente de atmósfera; no hay nada que frene la caída de rocas interplanetarias sobre ella. Tiene rotación sincrónica (27,3 días, lo mismo que su traslación alrededor de la Tierra) lo que implica que veamos siempre la misma cara y nunca la otra, la oculta. Esta lenta rotación también provoca que un punto cualquiera de la superficie lunar esté iluminado por el Sol unos 15 días seguidos para después sumergirse en la “noche” otros 15 días lo que, unido a la ausencia de atmósfera que distribuya el calor, hace que la temperatura alcance valores extremos: desde  $-170^{\circ}\text{C}$  hasta  $130^{\circ}\text{C}$ .

Su núcleo de hierro o sulfuros de hierro es pequeño (unos 400 km de radio) lo que explica la baja densidad lunar ( $3,4\text{ g/cm}^3$ ) y la ausencia de campo magnético. Por sus tamaños relativos (el radio lunar es el 27% del terrestre) se puede considerar al sistema Tierra-Luna más bien como un planeta doble.

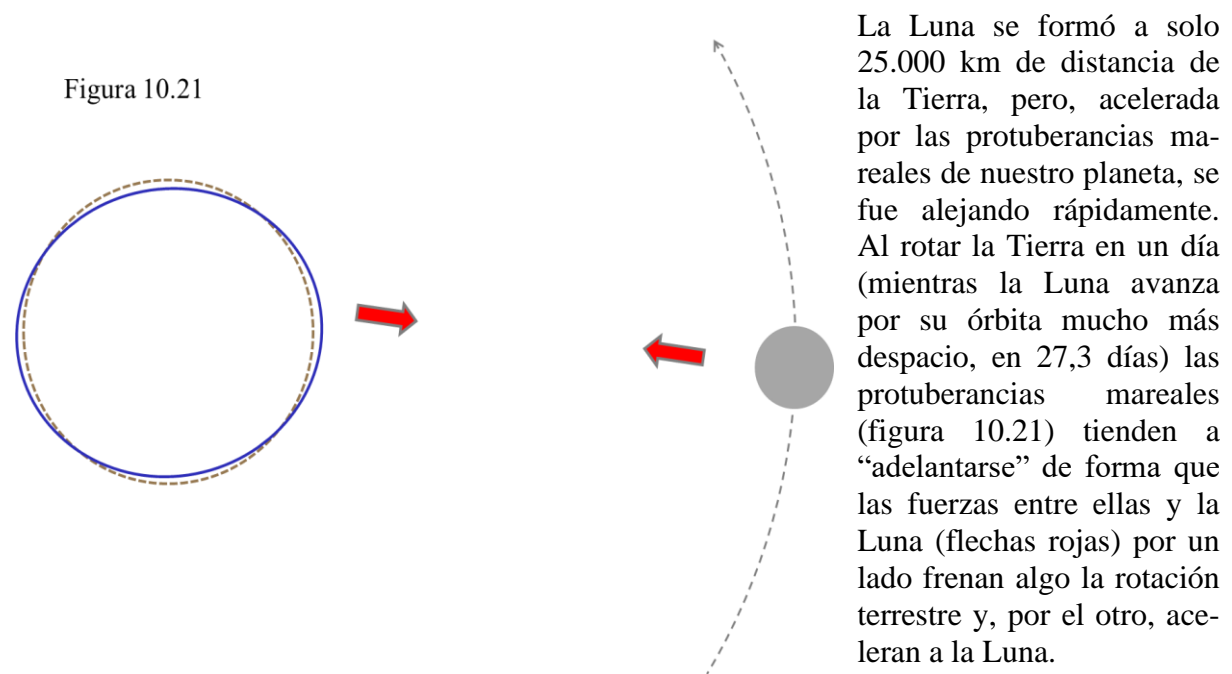


Casi toda la comunidad científica acepta la teoría del Gran Impacto: hace unos 4.530 Ma (millones de años) con los planetas ya casi completamente formados, un protoplaneta (Theia, del tamaño de Marte) chocó contra la Tierra; el manto de Theia se desparramó pero quedó en órbita retenido por la gravedad terrestre y al poco acabó formando el satélite. Eso explica el pequeño núcleo lunar y su baja densidad.

El núcleo metálico del impactor se fundió con el de la Tierra.

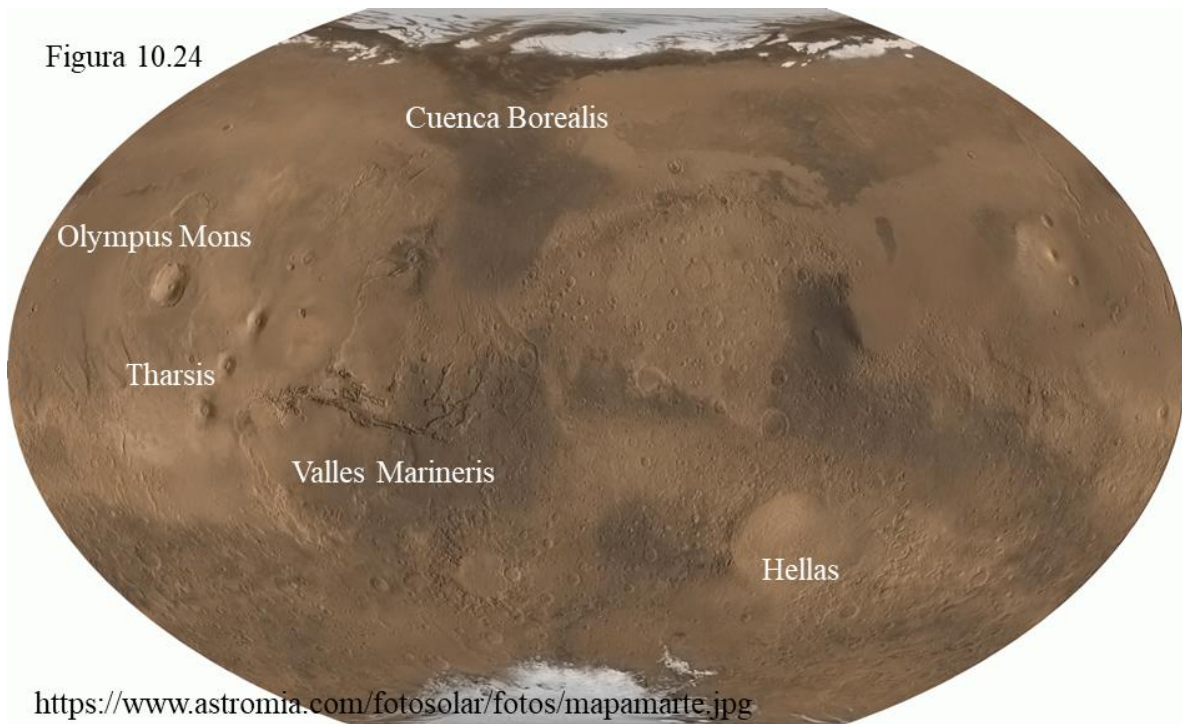


Esa formación de la Luna implica un tremendo calor generado por las colisiones de los fragmentos: buena parte del manto lunar sería un océano de magma fundido que se iría enfriando y finalmente (4.400 millones de años atrás) ocasionaría una superficie sólida. Después vino el Bombardeo Tardío (4.000 – 3.900 millones de años) causante de las enormes cuencas de impacto y, más adelante, (3.800 – 3.200 millones de años) el calentamiento radiactivo del manto fundió de nuevo sus materiales y se produjo el relleno de las cuencas de impacto por basalto.

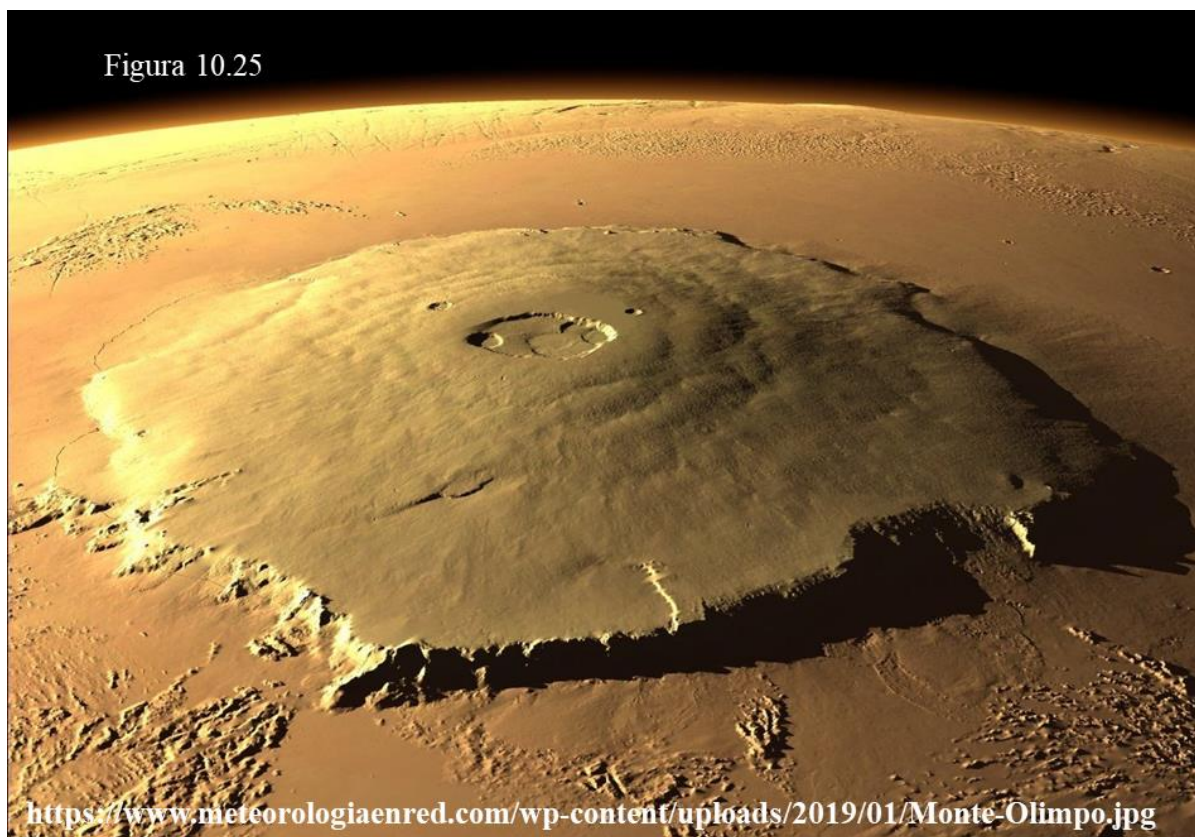


La distancia media actual a nuestro planeta es de 384.400 km, pero va aumentando unos 4 cm cada año. La rotación terrestre era antes más rápida y nuestro día más corto y por tanto nuestro año tenía más días, como demuestra el registro fósil de algunos corales.

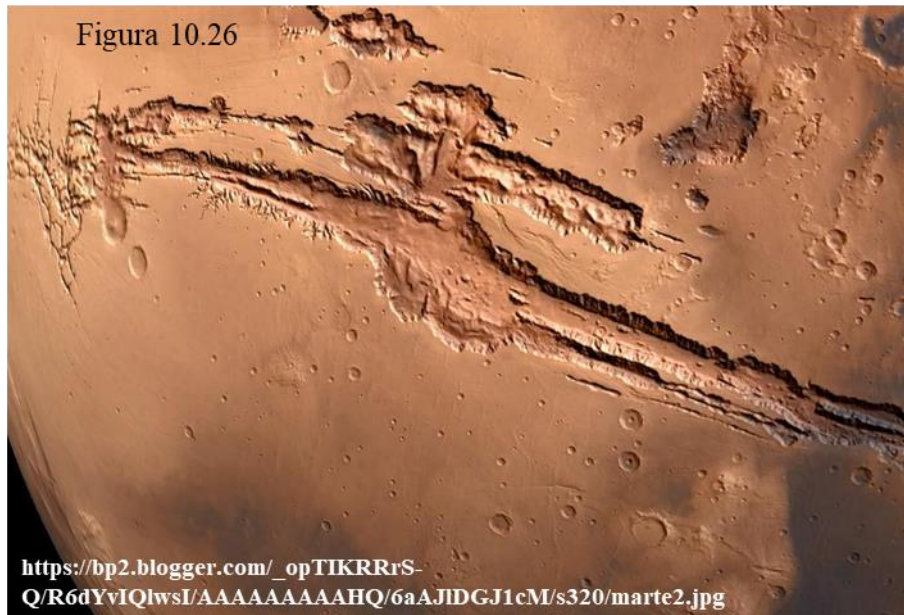




En la figura 10.24 se muestra el mapa de todo el planeta (se utiliza una proyección elíptica para poder mostrar su superficie al completo). Puede apreciarse que casi todo el hemisferio Norte está ocupado por una gran llanura, la cuenca Borealis, desprovista de cráteres. En cambio en el resto del planeta sí que abundan. Hay además algunas zonas altas, especialmente la meseta de Tharsis, donde se hallan varios grandes volcanes, entre ellos Olympus Mons de 21 km de altura (figura 10.25), el más alto de todo el Sistema Solar.



Hay algunas grandes cuencas de impacto (como Hellas) y un enorme cañón, el Valles Marineris (figura 10.26) de 4.500 km de longitud, 200 de anchura máxima y 11 de profundidad.



El tono rojizo de la superficie se debe a la presencia de óxidos de hierro, lo que lleva a suponer que en algún tiempo remoto hubo agua abundante. Los casquetes polares están formados por hielos de agua y de  $\text{CO}_2$ , y cambian de aspecto con las estaciones marcianas.

Es posible que buena parte de su superficie esté impregnada de agua helada. También se han detectado huellas de glaciares y de morrenas causadas por el movimiento de los hielos.

Hay muchos valles fluviales, algunos de gran tamaño que tuvieron que ser excavados por caudalosos ríos, aunque seguramente fueron efímeros, con enormes avalanchas de muy poco tiempo de duración; el agua procedería posiblemente del subsuelo helado.

Tiene una atmósfera muy tenue formada básicamente por  $\text{CO}_2$  y cantidades pequeñas de  $\text{N}_2$  y argón. Pero es una atmósfera muy polvorienta, dinámica, con grandes variaciones estacionales, vientos y tormentas de polvo. Así, hay abundantes campos de dunas y el color rojizo de su cielo es debido a las partículas de polvo en suspensión. Posiblemente tuvo en otros tiempos mayor densidad pero ha sido barrida por el viento solar.

La existencia de volcanes indica que, en algún momento, hubo actividad geológica importante pero no lo suficiente como para borrar grandes estructuras antiguas (las cuencas de impacto), cosa que sí ha sucedido en la Tierra. No hubo tectónica de placas pero los magmas ardientes del manto, al acercarse a la corteza pudieron fundir el hielo y provocar importantes corrientes de agua. Puede que durante algún tiempo hubiera un conjunto de lagos someros, o incluso un verdadero océano, en la Cuenca Borealis.

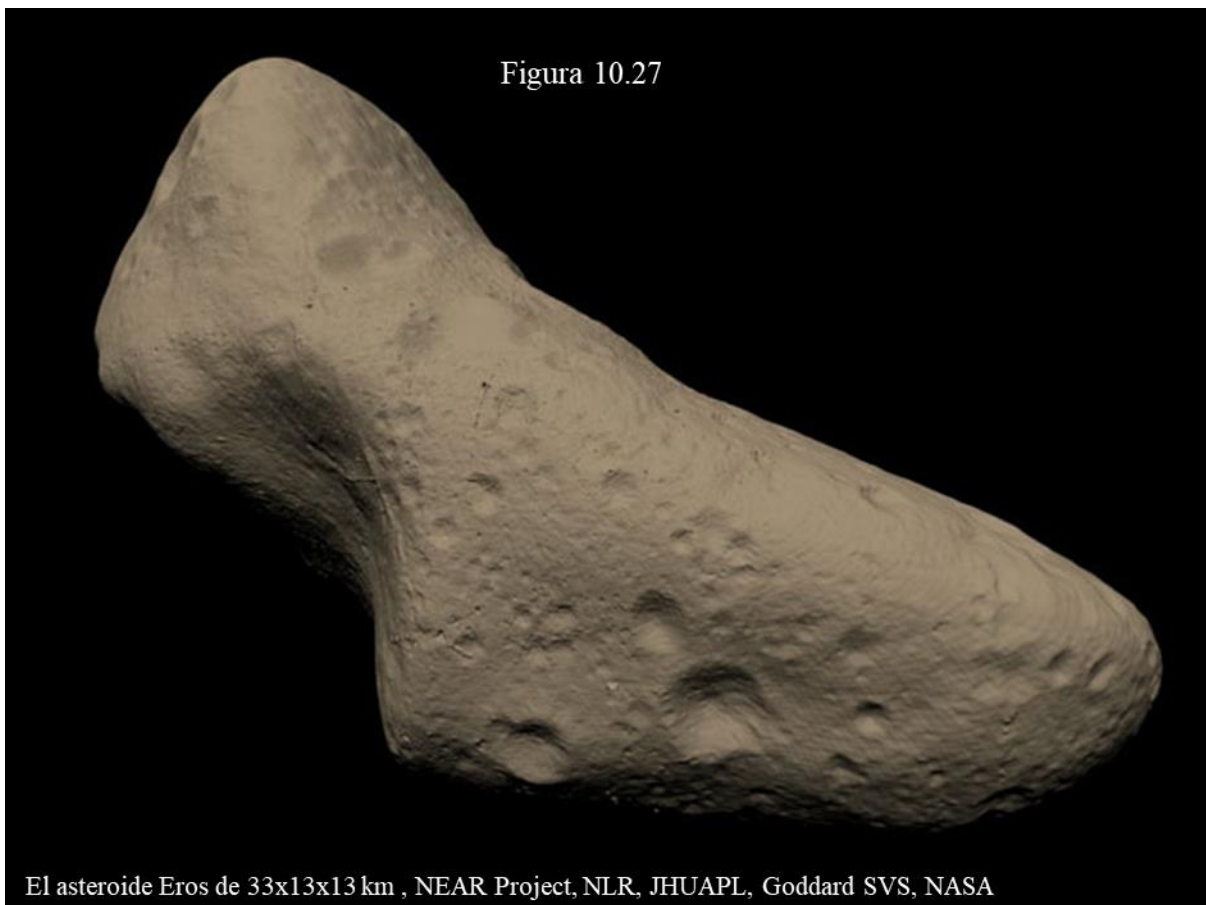
En resumen, el Marte primordial pudo tener una atmósfera densa cuyo efecto invernadero provocaría un clima moderado con agua líquida. Después se perdió la atmósfera, Marte se enfrió y el agua se helaría de manera que solo el calor interno residual (débil pero no nulo) causaría erupciones esporádicas que fundirían el hielo provocando breves pero intensas inundaciones.

Tiene dos satélites, **Phobos** y **Deimos**, ambos muy pequeños (unos 20 km) y de forma no esférica. Podrían ser asteroides capturados por la gravedad de Marte.

## 10.4 LOS ASTEROIDES

Constituyen un enjambre de pequeños cuerpos rocosos cuyas órbitas se sitúan, mayoritariamente, entre la de Marte y la de Júpiter. Sus tamaños son muy variados, desde los 500 km de radio de **Ceres**, el mayor de ellos y ahora recalificado como planeta enano (al igual que Plutón), hasta los pocos metros de otros muchos.

Cuando alguno es atrapado por la atracción gravitatoria de la Tierra y cae sobre ella, la fricción con la atmósfera lo volatiliza y deja en el cielo un breve rastro brillante: surge así una **estrella fugaz**, fenómeno que sucede cuando cualquier objeto entra a buena velocidad en la atmósfera, desde pequeñas partículas de polvo hasta cuerpos mucho más grandes (ver apartado 10.6). En ocasiones, si es de tamaño suficiente, no se desintegra del todo y llega a caer en la superficie terrestre: se trataría entonces de un **meteorito**, una piedra caída del cielo, un regalo para los geólogos planetarios, que pueden analizar a fondo su composición en los laboratorios y obtener información detallada (las únicas muestras de material no terrestre son las rocas lunares traídas por las misiones Apollo). Se clasifican en diferenciados (los que han sufrido choques y se han fundido) y los no diferenciados o condritas (que mantienen intacta su composición inicial, por lo que pueden darnos información sobre los primeros momentos del sistema solar). Los diferenciados suelen subdividirse en sideritos (casi todo, metales), siderolitos (metales y rocas) y acondritas (rocas).



La cercana atracción gravitatoria de Júpiter expulsó de esa zona a más del 99% de los objetos, impidiendo que se formara otro planeta. Los cuerpos de la zona interior del cinturón de asteroides se calentaron más, fundiéndose parcialmente y los metales cayeron al interior quedando

más arriba las rocas; en cambio los de la zona exterior no están diferenciados sino que presentan la misma estructura original.

Algunos asteroides se internan hasta cruzar la órbita terrestre y forman, junto con algunos cometas, los llamados NEOs (*Near Earth Objects*, Objetos Cercanos a la Tierra) que podrían chocar con nuestro planeta y provocar grandes cataclismos, como parece incontestable que ocurrió hace unos 65 millones de años cuando la caída de un gran meteorito de unos 10 km de diámetro provocó una extinción masiva de las especies vivas (entre ellas los dinosaurios).

### Ejercicio 10.3

La aceleración de la gravedad, en relación a la terrestre, se calcula mediante la fórmula

$$\frac{g_p}{g_T} = \frac{R_p \cdot d_p}{R_T \cdot d_T}$$

( $R_p$  = radio del planeta,  $R_T$  = radio de la Tierra,  $d$  es la densidad y  $g$  la aceleración de la gravedad)

	Sol	Mercurio	Venus	Tierra	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno
$R$ (km)	695.508	2.440	6.052	6.371	3.390	71.492	58.232	25.362	24.622
$d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,41	5,43	5,24	5,5	3,9	1,34	0,69	1,27	1,64

Por ejemplo, para Marte,  $\frac{g_p}{g_T} = \frac{3.390 \cdot 3,9}{6.370 \cdot 5,5} = 0,38$

la gravedad en Marte es solo 0,38 veces la terrestre. Una persona que pese 60 kilos en la Tierra pesaría en Marte  $60 \cdot 0,38 = 23$  kilos.

Calcula el valor relativo de la gravedad de cada planeta respecto a la terrestre. ¿Cuánto pesarías en Mercurio? ¿Y en Júpiter? ¿Y en el Sol?

Haz clic [aquí](#) para ver la solución.

## 10.5 LOS PLANETAS GIGANTES

### *Júpiter*

El gigante de los planetas no tiene ninguna superficie sólida y sólo podemos ver su densa atmósfera formada básicamente por  $H_2$  y He con pequeñas cantidades de agua, metano y amoníaco. Destacan en ella diferentes bandas paralelas al ecuador, oscuras o claras (estas formadas por cristales de amoníaco), en las que los vientos alcanzan 500 km/h y la Gran Mancha Roja (un enorme remolino que permanece estable desde hace al menos 300 años). Esta potente dinámica atmosférica hace pensar en una fuente de calor interno que mueva las nubes, así como en una rápida rotación que explicaría también el fácilmente observable achatamiento del planeta por los polos. A menudo se detectan auroras polares de gran tamaño (figura 10.28) lo que implica la existencia de un campo magnético muy intenso.

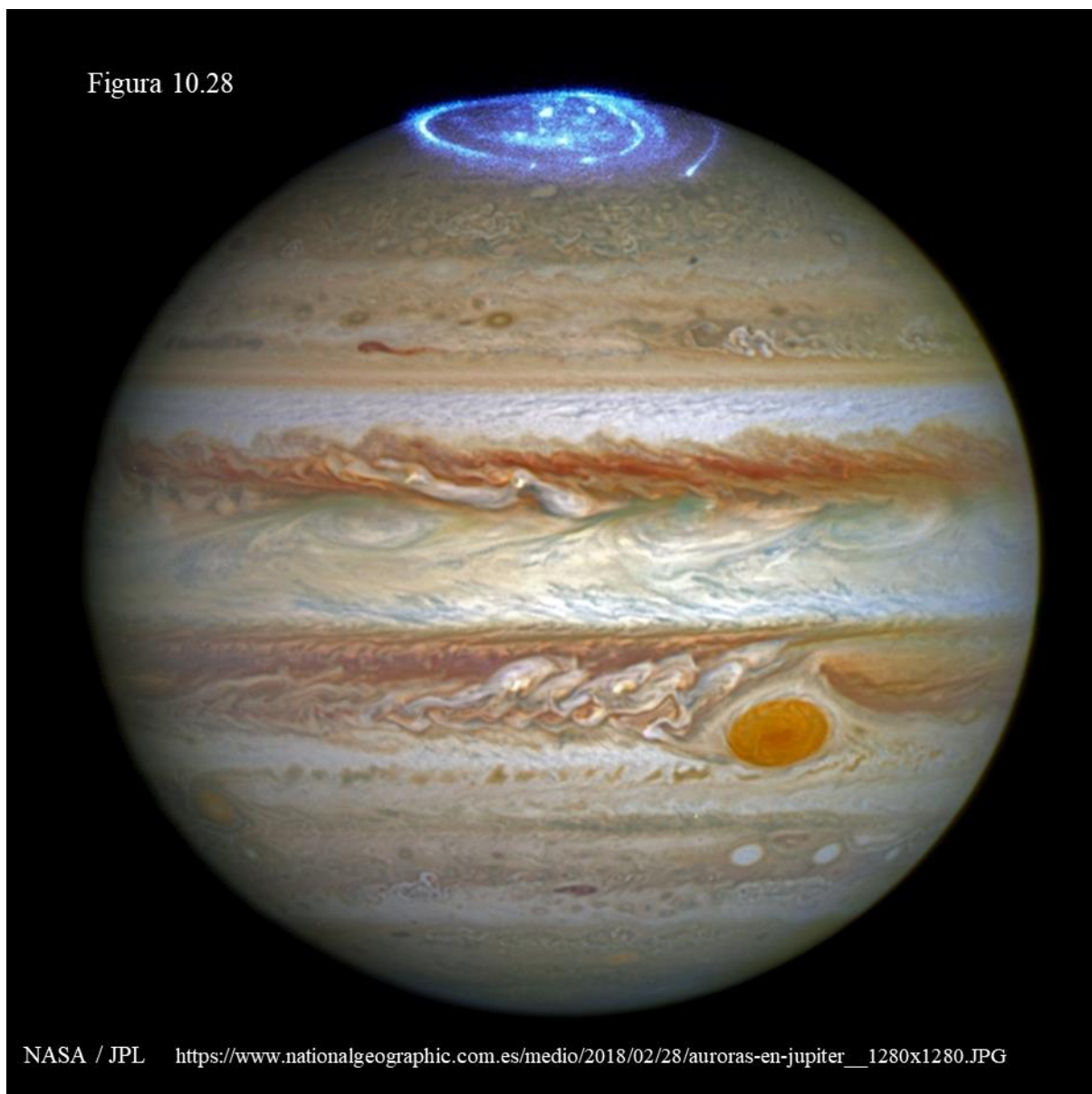
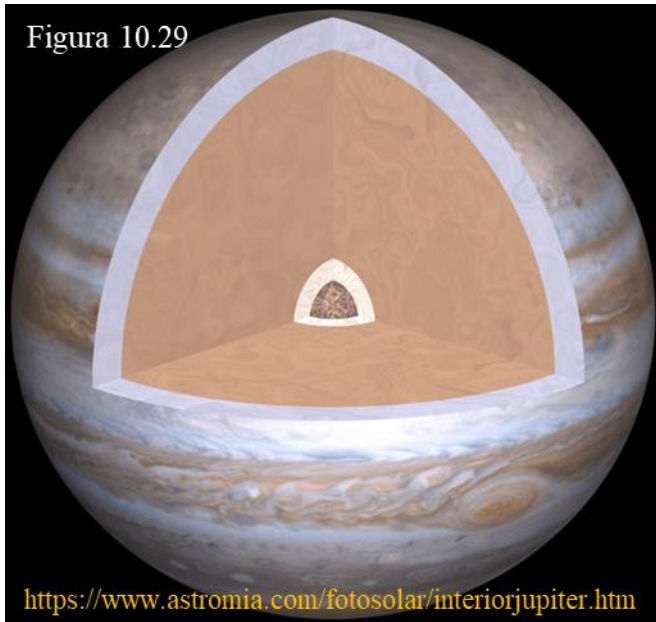


Figura 10.29



Los modelos teóricos para el interior de Júpiter (figura 10.29) indican un núcleo de rocas (quizá con algo de hierro) del tamaño de la Tierra en el que la temperatura sería de unos 20.000 K, rodeado de una delgada capa de hielos (de agua, de amoníaco y de metano, los clásicos volátiles); la mayor parte (el 70% del radio del planeta) estaría formada por hidrógeno metálico (sus átomos, debido a la enorme presión, han perdido los electrones que se mueven libremente) con bastante helio; en conjunto esta capa se comporta más como un líquido que como un gas y su movimiento sería la causa del campo magnético; por último la capa inmediatamente bajo las nubes externas sería gaseosa y contendría hidrógeno molecular ( $H_2$ ) y algo de helio.

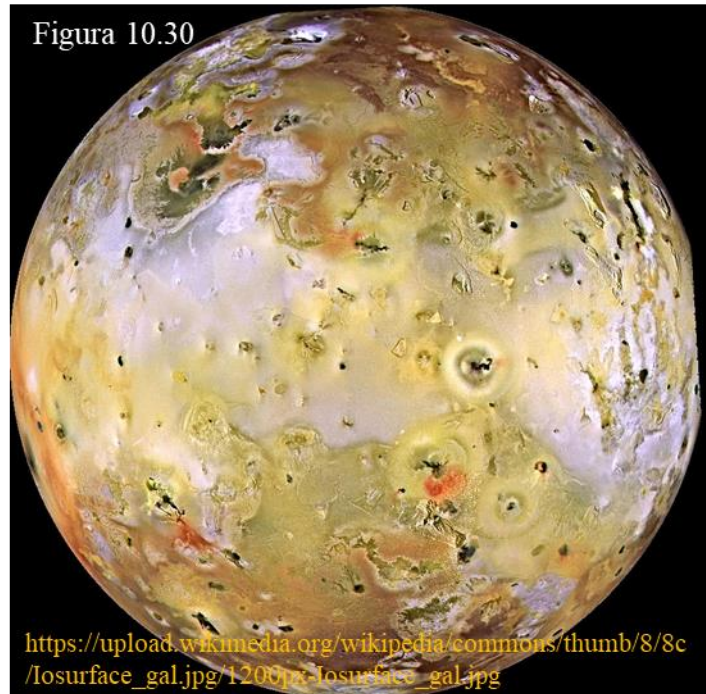
geno molecular ( $H_2$ ) y algo de helio.

Así pues los elementos más abundantes en Júpiter son, como en el Sol, el H y el He. A diferencia de los planetas rocosos su enorme masa le ha permitido retener los gases ligeros. Tiene un débil anillo, descubierto en 1979 por las cámaras de la sonda Voyager 1, y numerosos satélites, entre los que destacan los cuatro descubiertos por Galileo en 1610 y anunciados al mundo en su libro *Sidereus Nuncius* (El Mensajero sideral).

- **Ío:** su superficie tiene un aspecto asombroso (figura 10.30) sin cráteres de impacto y con una gama muy completa de colores en los que predomina el amarillo debido al azufre o a sus compuestos ( $SO_2$ ); se han fotografiado multitud de volcanes activos (unos 500) que expulsan al exterior vapores de azufre procedentes del manto, que debe de estar fundido. Incluso se han detectado algunas de estas erupciones con penachos que alcanzan 300 km de altura.

Es el cuerpo del sistema solar más activo geológicamente, lo que implica una alta temperatura interior que se explica por las intensas **fuerzas de marea** (ver ampliación de la página siguiente) causadas por su cercanía al gigante Júpiter. El manto es rocoso, formado por silicatos, y el núcleo metálico es bastante grande, es decir su composición es semejante a la de los planetas terrestres.

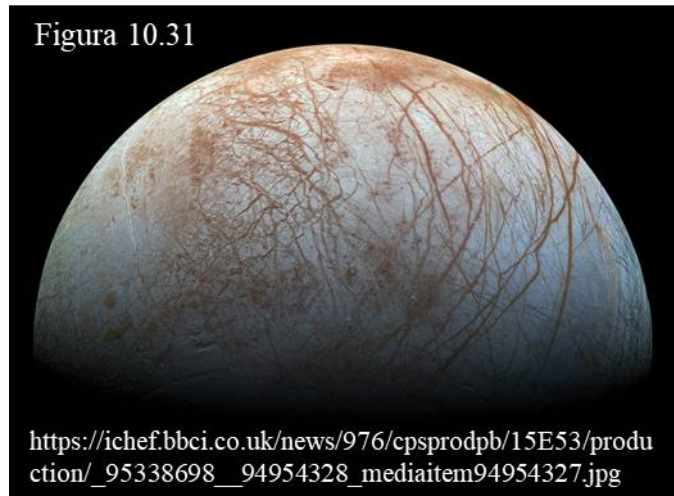
Figura 10.30







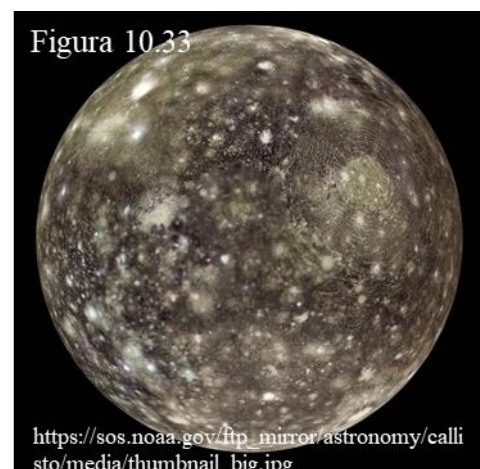
- **Europa:** su superficie, prácticamente sin relieve, es un mar de agua helada surcado por numerosas y largas grietas y con unos pocos cráteres de impacto (figura 10.31). Esta corteza puede tener unos 5 km de espesor y debajo de ella se sitúa un océano de agua salada de unos 100 km de grosor; un manto rocoso y un núcleo metálico completan la estructura del satélite. Las fuerzas de marea también provocan cierto calentamiento interno, mucho menor que en Ío, por lo que en Europa sí puede haber agua líquida (el calor es insuficiente para evaporarla), pero la actividad geológica se reduce al llamado criovulcanismo que ocasiona las fracturas y grietas por las que el agua líquida sale al exterior para congelarse inmediatamente.



- **Ganímedes:** es el mayor de los satélites del Sistema Solar, superando incluso al planeta Mercurio. Su densidad de  $1,9 \text{ g/cm}^3$  hace pensar en un núcleo de rocas con pocos metales y un océano de agua líquida salina sepultado bajo una corteza helada (unos 150 km de espesor). Su superficie, repartida entre zonas claras y oscuras, está prácticamente saturada de cráteres de impacto; hay restos de alguna cuenca de impacto y también se observan algunas crestas, producidas posiblemente por hundimientos o levantamientos muy antiguos, (en la actualidad no hay actividad geológica) y no hay criovulcanismo (formación de volcanes a muy baja temperatura).



- **Calisto:** completamente saturado de cráteres de impacto y con algunas cuencas de impacto bien visibles (como Valhalla, en la derecha de la imagen), pero sin crestas ni grietas, tiene una superficie oscura debida a compuestos de carbono (procedentes de impactos cometarios) que ensucian la corteza de hielo, de unos 150 km de espesor; bajo ella parece situarse una delgada (10 km) capa de agua salina y un gran núcleo formado por hielo y rocas. No tiene las fuerzas de marea de sus hermanos más próximos a Júpiter por lo que carece de calor interno y de actividad geológica.

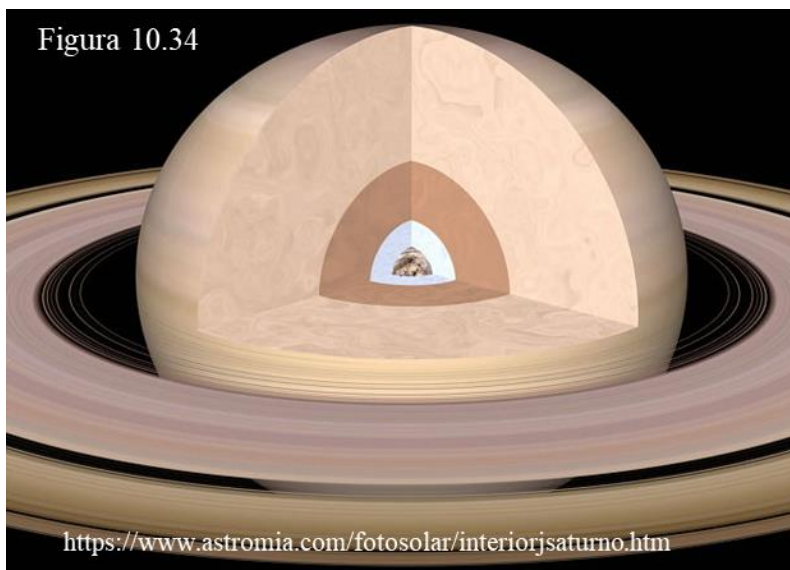


Vemos así que en torno a Júpiter se reproduce un esquema similar al de todo el sistema solar, con un gran objeto central de H y He rodeado de cuerpos rocosos.

## Saturno

El segundo planeta por su tamaño constituye uno de los objetos más llamativos para la observación telescópica, debido a sus anillos. Apenas tienen un espesor que oscila entre 10 m y 1 km y están formados por una multitud de pequeñas partículas (1 cm – 10 m) de agua helada. La principal separación oscura en su interior es la división de Cassini. Inmersos en ellos hay varios pequeños satélites conocidos como las “lunas pastoras” que parecen mantener en orden el rebaño de hielos. El origen de los anillos es controvertido; quizá sean el resultado de choques destructivos.

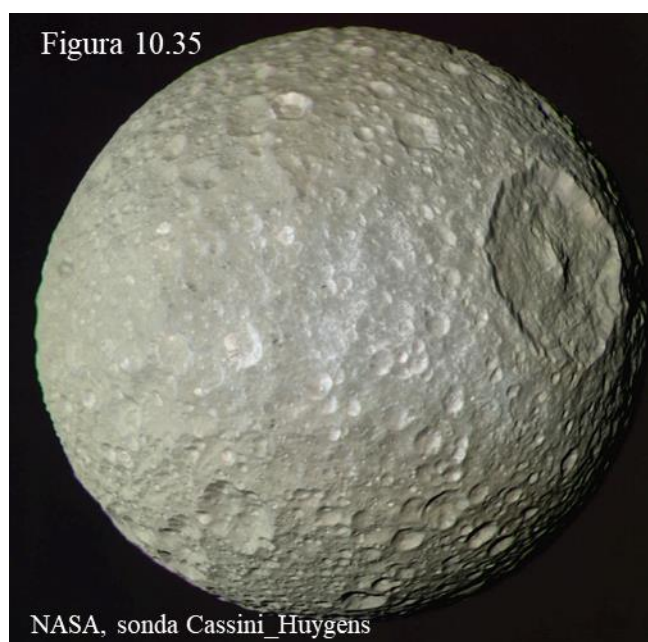
Es muy parecido a Júpiter en todo. Hay también bandas atmosféricas paralelas al ecuador aunque menos nítidas que en Júpiter, vientos que pueden alcanzar los 1.800 km/h y tormentas estacionales (cada 30 años).



Su menor densidad ( $0,69 \text{ g/cm}^3$ , ¡flotaría en el agua!) indica un núcleo más reducido lo que se explica por su menor masa: hay menos calor interno y por tanto el movimiento atmosférico es menor; la capa de H metálico tiene que estar más profunda y es menos gruesa; junto a su rápida rotación todo ello explica su achatamiento más acusado (un 10%). El núcleo rocoso puede tener unas 15 masas terrestres, una densidad de  $13 \text{ g/cm}^3$  y alcanzar 13.000 K.

Entre sus múltiples satélites destacan:

- **Mimas**, cuya apariencia inspiró, probablemente, a los creadores de la serie *Star Wars*.



- En **Encélado** se han detectado géiseres en su zona polar sur lo que evidencia alguna actividad geológica. Tiene un pequeño núcleo rocoso y el resto es hielo pero debe tener algo de calor interno (debido a las fuerzas de mareas) que permite la existencia de un hipotético océano subterráneo (gracias a la presencia de amoníaco disuelto que hace de anticongelante) del que surgen esos géiseres.

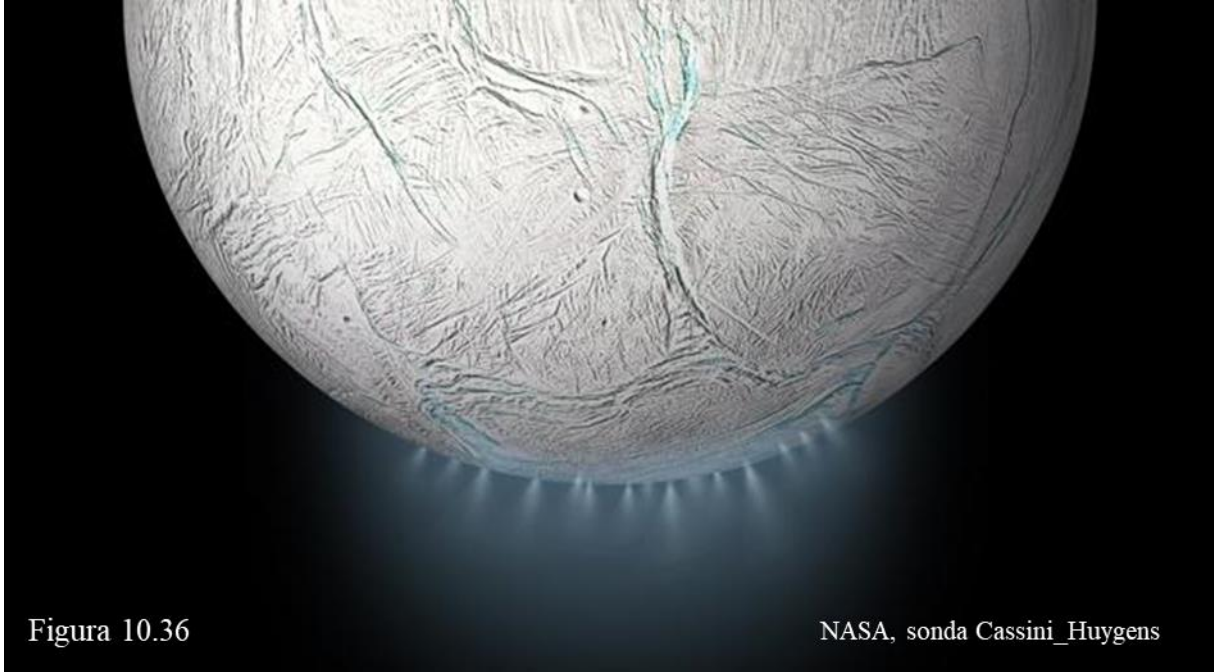


Figura 10.36

NASA, sonda Cassini\_Huygens

- **Titán** (figura 10.37) tiene una atmósfera más densa que la terrestre formada por  $N_2$  (95%) y metano (4%) con una capa anaranjada de nubes altas de hidrocarburos producidos por la descomposición del metano por los rayos UVA. Esta capa absorbe la radiación solar y la temperatura (que oscila entre  $-191^{\circ}C$  y  $-137^{\circ}C$ ) permite que el metano pueda existir en sus tres estados (helado, líquido o gaseoso) y que haya un ciclo parecido al del agua terrestre: nubes, lluvias, ríos y lagos (figura 10.38). Hay varios indicios de cierta actividad geológica como la permanencia de la atmósfera (que requiere continuos aportes de metano procedentes del interior), rasgos de erosión o grupos de montañas.



Figura 10.37

<https://cdn.mos.cms.futurecdn.net/9iU3dyQeU8XhzVeuCDQ8D.jpg>

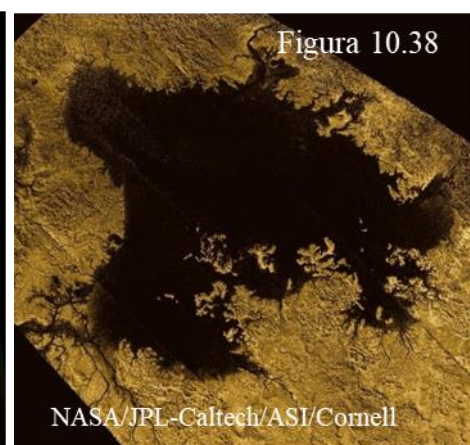
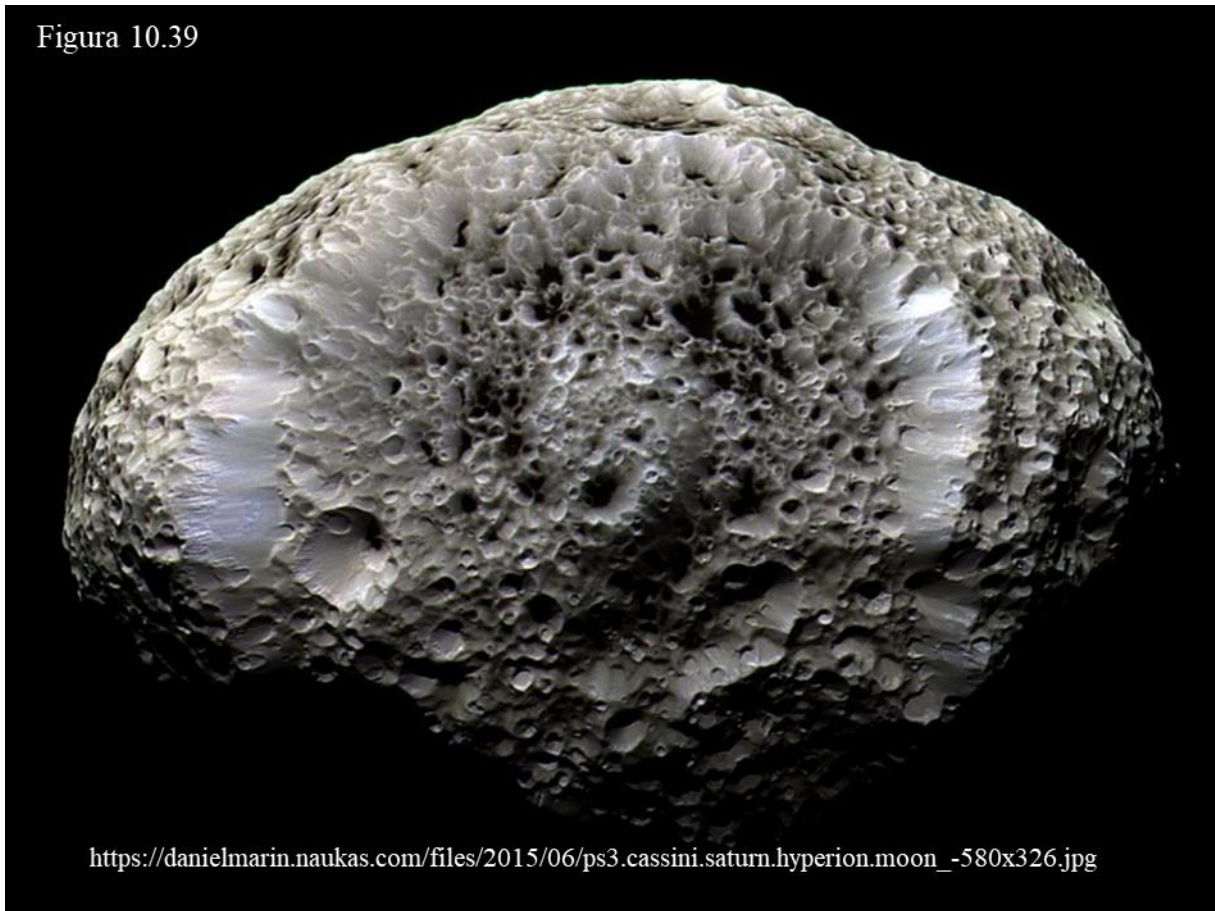


Figura 10.38

NASA/JPL-Caltech/ASI/Cornell

- **Hiperión**, cuyo aspecto es parecido al de una esponja.

Figura 10.39



- **Japeto**. Presenta un hemisferio de avance muy oscuro (figura 10.40) debido al material (carbonoso) que cae sobre él. En cambio, el otro es mucho más claro. Tiene una extraña cresta ecuatorial de ¡30 km de altura!, (figura 10.41) la mayor de todo el sistema solar. ¿Podría deberse a deformación centrífuga?

Figura 10.40

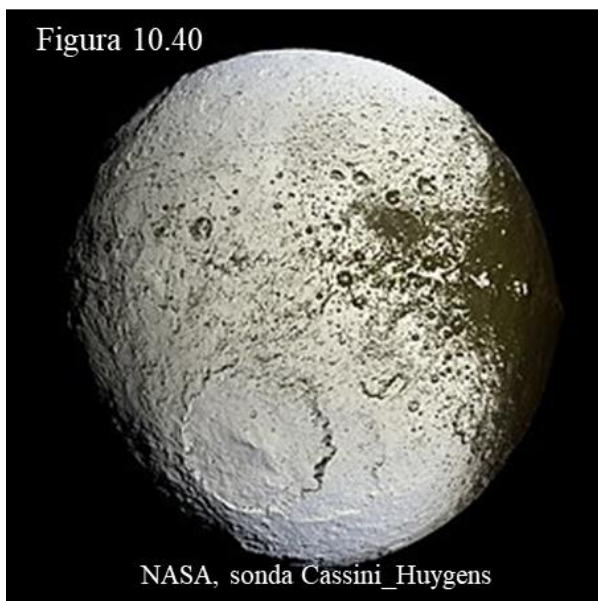
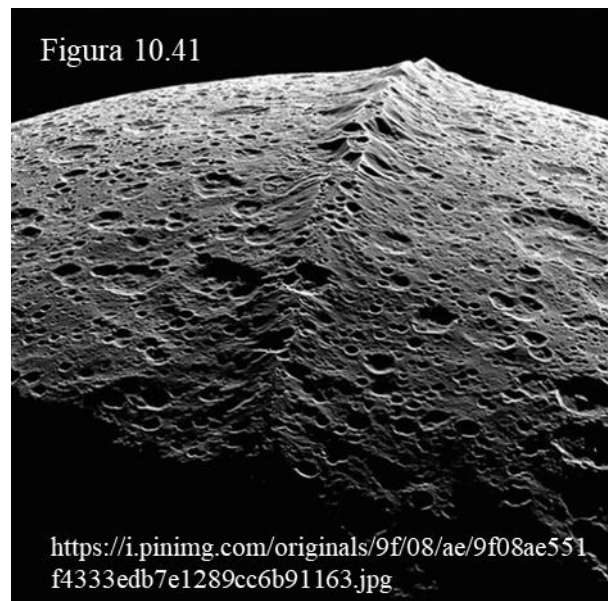
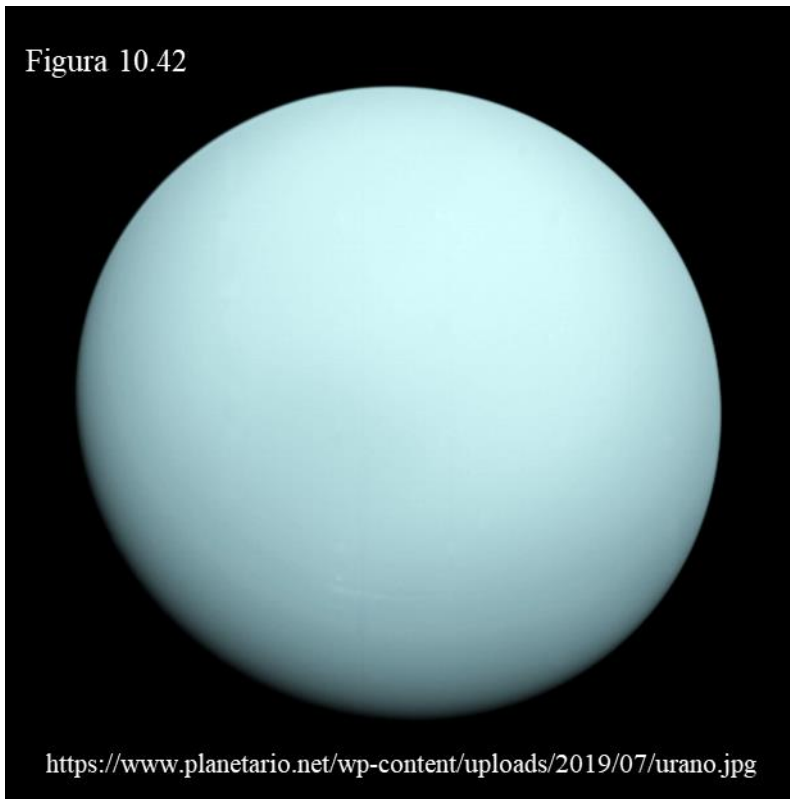


Figura 10.41



## Urano

Figura 10.42

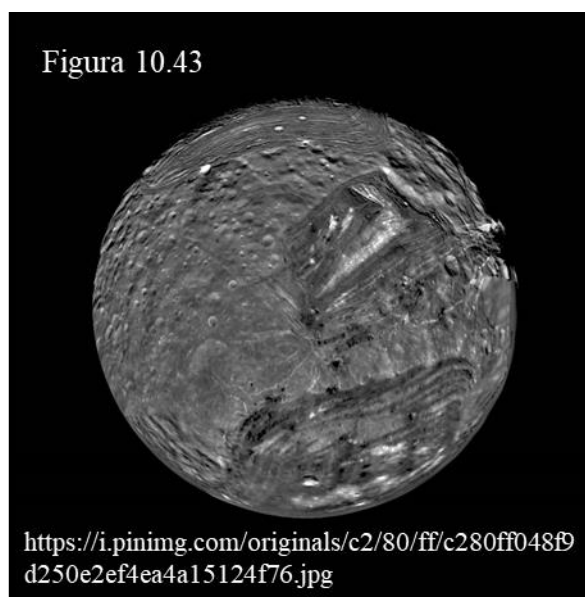


Apenas visible a simple vista, pasó desapercibido hasta que fue descubierto por William Herschel en 1781. Su aspecto al telescopio es un pequeño disco uniforme de un azul pálido (figura 10.42). Es mucho menos conocido que los anteriores planetas pues solo la sonda Voyager 2 pasó cerca de él en 1986.

El color de su atmósfera (formada por H y He) se debe a nubes de metano. Presenta muy débiles bandas y algún difuso óvalo lo que indica poco movimiento, poca convección, y por tanto escaso calor interno. Tiene un núcleo pequeño de rocas y quizá algo de hierro y un extenso manto

consistente en un océano de agua en estado líquido, fluido, debido a la presión, no a la temperatura, con amoníaco y metano en disolución. Por eso a Urano se le califica, no como gigante gaseoso, sino como gigante de hielo (por estar formado principalmente de agua, metano y amoníaco, sustancias llamadas “hielos” por los geólogos planetarios). Tiene un campo magnético lo que implica que el manto fluido debe ser un buen conductor eléctrico, con las sustancias disueltas ionizadas.

Figura 10.43



La inclinación de su eje de rotación ( $98^\circ$ ) hace que los polos se sitúen casi en el plano de la eclíptica. ¿Por qué esta oblicuidad? La explicación clásica es catastrofista: una colisión muy importante, en las primeras fases de formación, lo tumbó. Pero se han abierto paso otras hipótesis gradualistas: las resonancias gravitatorias con otros planetas y los ajustes correspondientes podrían también dar cuenta de ello, como avalan modelos teóricos.

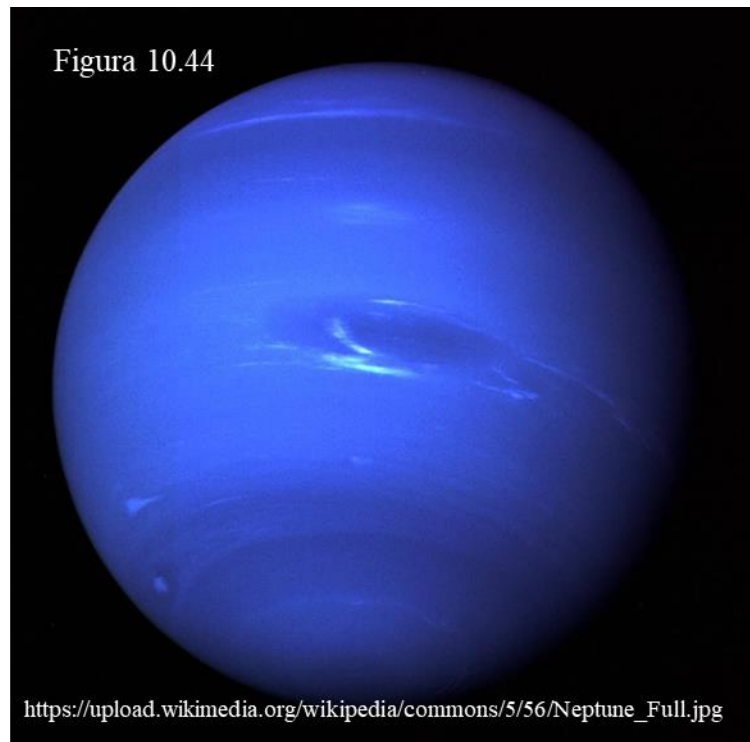
También presenta unos débiles anillos, cuyo origen y estabilidad se debaten y unos cuantos satélites, entre los que destaca **Miranda** que exhibe unas inquietantes estructuras (“coronas”) que parecen el resultado de fuerte actividad geológica o de impactos.

## Neptuno

Su existencia fue predicha y su posición calculada matemáticamente en 1846 por Adams y Leverrier teniendo en cuenta las perturbaciones detectadas en la órbita de Urano. J. G. Galle, en el observatorio de Berlín, localizó efectivamente el nuevo planeta muy cerca de la posición prevista teóricamente. Un verdadero éxito científico de primer orden.

Su atmósfera (de hidrógeno y helio) es de un bonito color azul violáceo debido a las nubes de metano y muestra bandas paralelas al ecuador bien marcadas y algunos grandes óvalos inestables (se han movido y desaparecido), así como vientos apreciables lo que señala la existencia de convección en ella y por tanto una fuente de energía interna.

Su estructura es similar a la de Urano. Atmósfera pequeña, un amplio manto de agua líquida (con amoníaco y metano disueltos) y un núcleo rocoso y metálico. Los movimientos en el manto generan su campo magnético.



Los modelos no conciben que en la nebulosa protosolar y a la distancia actual de Neptuno (30 UA) hubiera suficiente materia como para que se formara un planeta tan grande, por lo que sospechan que este planeta de hielo se formó más cerca del Sol y que luego migró.

Visitado únicamente por la Voyager 2 tiene varios anillos muy débiles, uno de ellos con arcos de mayor densidad y sus correspondientes “lunas pastoras”.



Su satélite **Tritón** (figura 10.45) es bastante grande y su órbita retrógrada está muy inclinada ( $21^\circ$ ) respecto al ecuador de Neptuno, por lo que se cree que es un protoplaneta capturado. Su superficie es una mezcla de  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO$  y  $CH_4$  helados y presenta signos claros de abundante actividad criovolcánica (calderas, llanuras inundadas por lavas, crestas, pocos cráteres de impacto). La energía para tales esfuerzos geológicos probablemente provenga de las violentas mareas causadas en su captura. Tiene un núcleo metálico, manto rocoso y superficie de hielos.

#### Ejercicio 10.4

Para comparar los tamaños (los radios o los diámetros) de dos planetas no hay más que dividir sus radios. Por ejemplo, Neptuno es casi cuatro veces mayor que la Tierra porque

$$\text{Radio Neptuno} / \text{radio Tierra} = 24.622 / 6.371 = 3,86$$

	Mercurio	Venus	Tierra	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno
R (km)	2.440	6.052	6.371	3.390	71.492	58.232	25.362	24.622

Para un planeta más pequeño, como Marte:

$$\text{Radio Marte} / \text{radio Tierra} = 3.390 / 6.371 = 0,53$$

Lo que nos viene a decir que Marte es algo más de la mitad de la Tierra (un 53%).

Completa así esta tabla:

Mercurio	Venus	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno
		53%				3,86

Si hiciéramos una maqueta a escala y la Tierra fuera una bola de 10 cm de diámetro, ¿qué diámetro tendrían que tener las otras bolas-planetas?

Haz clic [aquí](#) para ver la solución.

#### Ejercicio 10.5

Pero si queremos comparar el volumen de un planeta con respecto al terrestre, como todos los cuerpos tienen tres dimensiones, ancho, alto y profundo, tenemos que elevar al cubo la relación obtenida en el ejercicio anterior.

Así, Neptuno tiene un volumen que es  $3,86^3 = 57,7$  veces el nuestro. Es decir, en Neptuno cabrían más de 57 tierras.

Y Marte sería solo  $0,53^3 = 0,15$  tierras; el volumen de Marte es un 15% del de la Tierra.

Completa de nuevo:

Mercurio	Venus	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno
		15 %				57,7

Haz clic [aquí](#) para ver la solución.



### Ejercicio 10.6

Pero si lo que queremos es comparar las masas la cosa se complica un poco, pero solo un poco. Porque además del volumen tenemos también que tener en cuenta las densidades.

Neptuno tiene un volumen que es 57,7 veces el de la Tierra, pero su densidad es considerablemente menor:

$$\text{Masa Neptuno} / \text{masa Tierra} = 57,7 \cdot d_{\text{Neptuno}} / d_{\text{Tierra}} = 57,7 \cdot 1,64 / 5,5 = 17,21$$

En una balanza harían falta 17 tierras para equilibrar la masa de Neptuno.

	Mercurio	Venus	Tierra	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno
$d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	5,43	5,24	5,5	3,9	1,34	0,69	1,27	1,64

$$Y \text{ masa Marte} / \text{masa Tierra} = 0,15 \cdot 3,9 / 5,5 = 0,106$$

La masa de Marte es solo un poco más del 10% de la terrestre.

Completa la siguiente tabla:

Mercurio	Venus	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno
		10,6 %				17,21

Haz clic [aquí](#) para ver la solución.

## 10.6 OTROS CUERPOS MENORES

### Cometas

Su aspecto visual (figura 10.46) consiste en un extremo brillante, la “coma” (la “cabeza”), seguida de una larga cola (“kometés” en griego significa “de larga cabellera”). Estas llamativas, breves y, sobre todo, inesperadas apariciones causaban un gran impacto y pánico generalizado siendo interpretadas como presagios de graves infortunios.

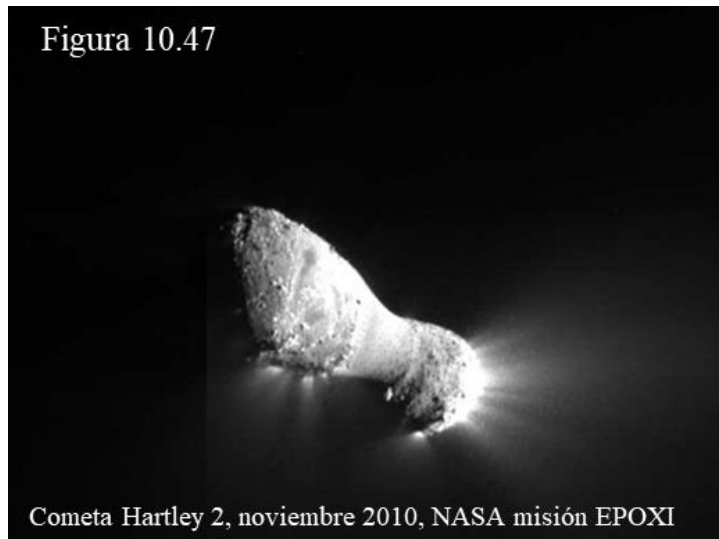
Figura 10.46



[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/15/Comet\\_P1\\_McNaught02\\_-\\_23-01-07.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/15/Comet_P1_McNaught02_-_23-01-07.jpg)

En realidad (figuras 10.47 y 10.48), son pequeños objetos irregulares (unos pocos kilómetros de tamaño) de órbitas muy excéntricas. Consisten en una “bola de nieve sucia” (80% de agua helada mezclada con monóxido de carbono CO, CO<sub>2</sub>, rocas). Cuando están muy lejos del Sol permanecen inactivos, congelados, pero al acercarse el calor hace que parte de sus hielos se sublimen (pasen directamente de sólido a gas) y formen la brillante cabellera o coma, que rodea al núcleo. El viento solar se encarga de expulsar (en la dirección opuesta al Sol) parte de esos gases formándose así la cola, de gran tamaño (hasta 100 millones de km) pero baja densidad, que es lo más espectacular de los cometas vistos desde la Tierra.

Figura 10.47



Cometa Hartley 2, noviembre 2010, NASA misión EPOXI

Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko,  
noviembre 2014, sonda Rosetta (ESA)

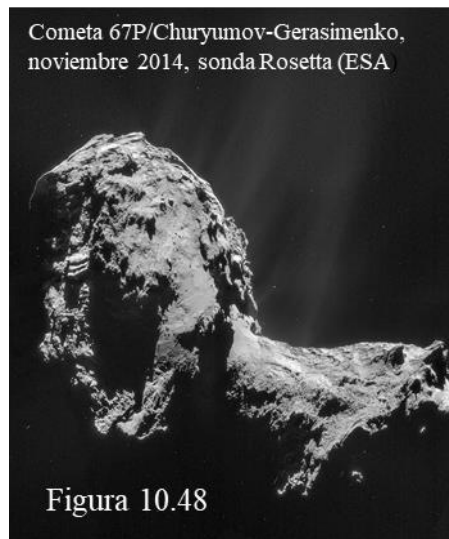
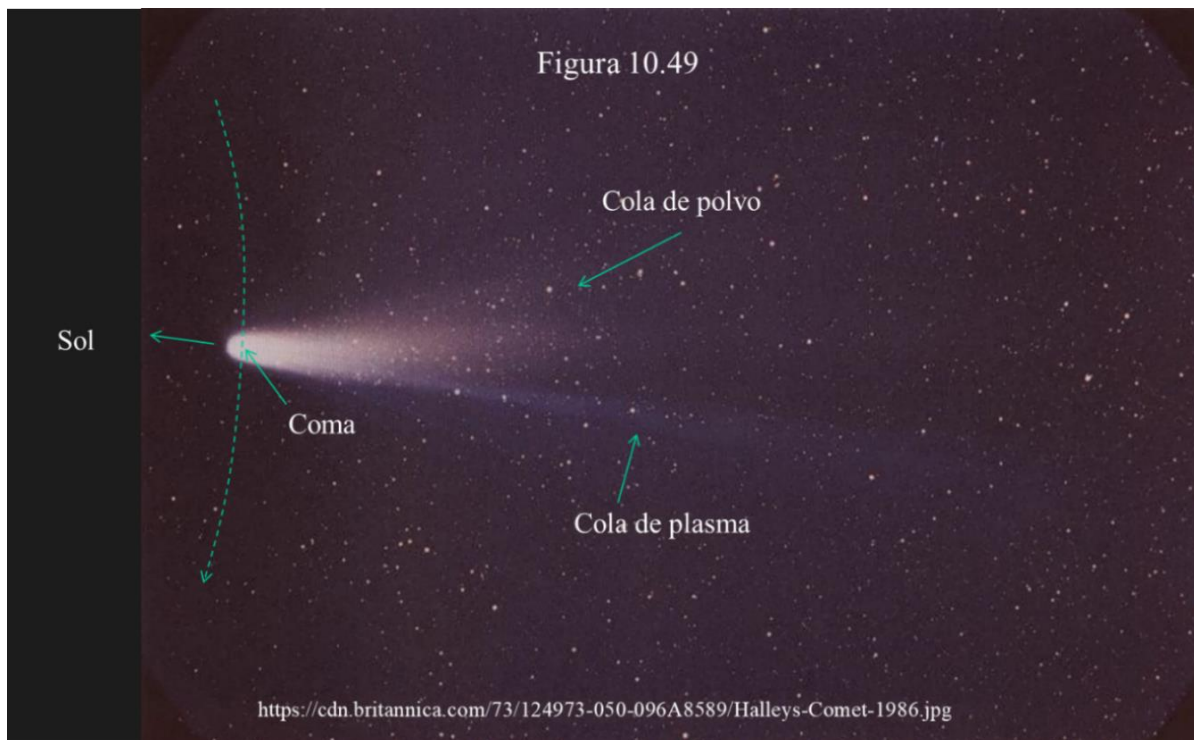


Figura 10.48

Suelen tener dos colas (figura 10.49), una recta, la de plasma, producida por partículas ionizadas dirigidas por el viento solar y otra, la de polvo, ligeramente curvada porque al alejarse del Sol esas motas de polvo pierden algo de velocidad (conforme a las leyes de Kepler) y se quedan atrás. Se clasifican en cometas de período corto (menor de 20 años, cuya órbita suele ser interior a la de Júpiter), medio (entre 20 y 200 años, como el Halley) y largo (mayor de 200 años). La mayoría tienen órbitas elípticas (con el Sol en un foco) y sus apariciones se suceden periódicamente (algunos cada pocos años, otros cada cientos de años) También los hay que sólo se hacen visibles una vez llevando órbitas abiertas (parábolas o hipérbolas).



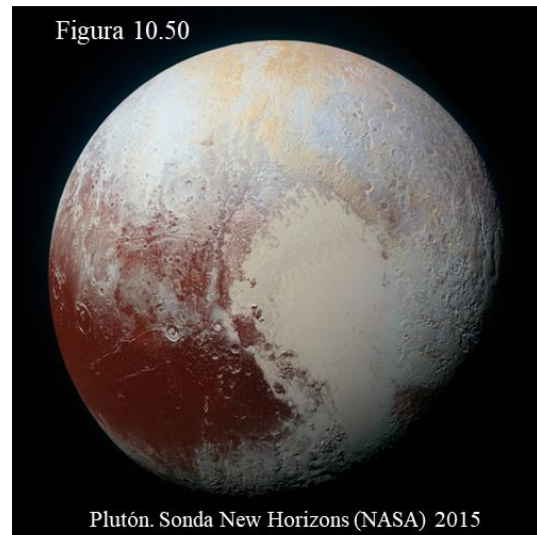
En cada paso por su perihelio un cometa pierde parte de su materia por lo que se va gastando y puede terminar en un resto inactivo (que sería un asteroide), o bien puede morir estrellándose contra el Sol, un planeta o un satélite, o incluso ser capturado por algún planeta y convertirse en su satélite.

Esas motas de polvo que pierde el cometa cuando está activo, cerca de su perihelio, quedan en órbita en torno al Sol y si la Tierra en su curso anual atraviesa una zona en la que abundan esos restos se producen en la atmósfera frecuentes estrellas fugaces: es lo que se llama una “**lluvia de estrellas**”. En esta tabla tienes las más importantes.

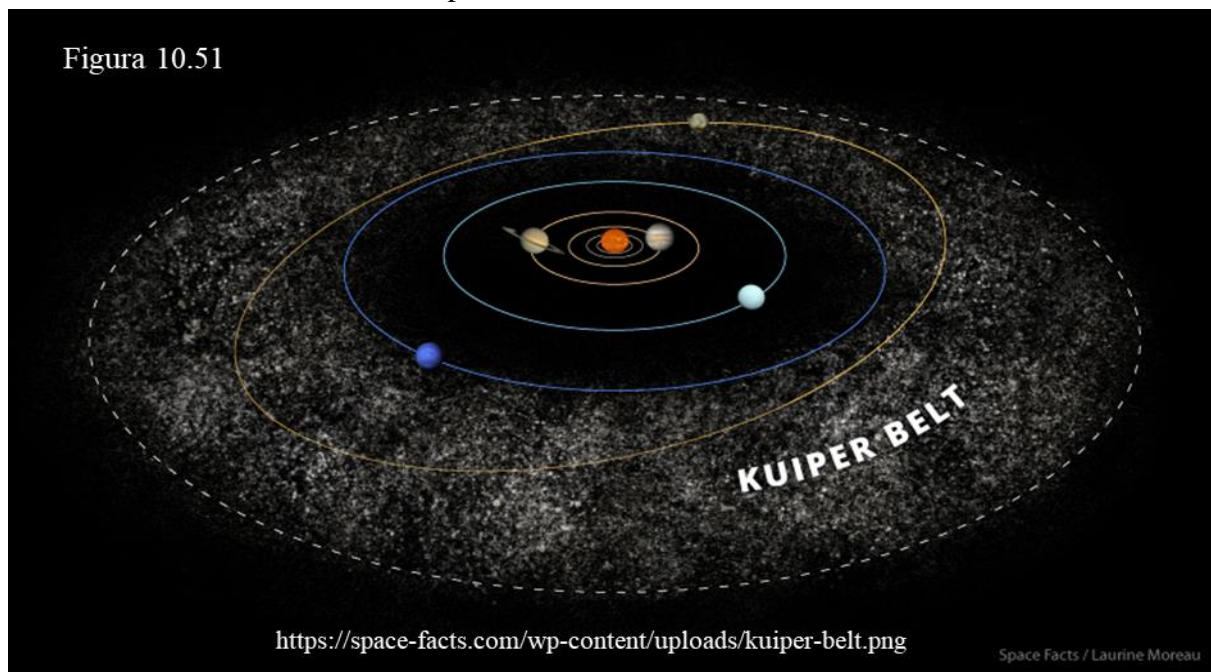
Nombre	Fecha	Cometa asociado
Perseidas	12 agosto	Swift-Tuttle
Oriónidas	21 octubre	Halley
Táuridas	7 noviembre	Encke
Leónidas	17 noviembre	1866 I
Gemínidas	13 diciembre	Faetón (cometa extinto)

## Los confines del sistema

**Plutón** (figura 10.50) fue considerado como planeta desde su descubrimiento en 1930 por un joven de 23 años, Clyde Tombaugh, desde el observatorio Flagstaff de Arizona. Sin embargo, su pequeño tamaño (menor que la Luna), su gran inclinación orbital y alta excentricidad le situaban muy al límite para tan alta dignidad. El descubrimiento en la década de 1990 de otros numerosos cuerpos con órbitas similares (a unas 40 UAs) fue decisivo y en 2006 la Unión Astronómica Internacional decidió incluir a Plutón en una nueva categoría: los planetas enanos.



Así pues, más allá de Neptuno nos encontramos con un nuevo conjunto disperso de cuerpos que forman el **cinturón de Kuiper** (figura 10.51) y que ocupa un enorme espacio entre 30 y 500 UAs. El cinturón principal se sitúa en el interior (30 – 50 UAs) donde están, entre otros, los objetos con órbitas similares a Plutón (y que por eso se denominan “plutinos”) y la inmensa zona exterior es mucho más dispersa aún.



Los componentes del cinturón de Kuiper podrían darnos pistas sobre los primeros tiempos de la formación del sistema solar en estas zonas externas ya que parecen estar preservados tal y como se originaron (ver tema 11). Se les considera como un depósito de posibles cometas pues si sufren alguna perturbación gravitatoria podrían cambiar su órbita, “caer” hacia el interior del sistema y convertirse en un cometa de período corto o medio.

Finalmente, en la **nube de Oort**, una estructura esférica centrada en el Sol y que se extiende entre 1.000 y 100.000 UA (¡más de un año luz!), están aparcados un gran número de objetos congelados que, si sufren alguna desestabilización en su órbita, pueden acercarse al centro y transformarse en un inesperado cometa, quizá visible desde nuestro planeta azul para nuestro asombro y admiración.

## Ampliación: cálculo de masas

### La Tierra

Cualquier objeto de cualquier masa  $m$  cae hacia la superficie terrestre con la misma aceleración ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ ). Esa aceleración se debe a la fuerza de atracción gravitatoria que la Tierra (de masa  $M$ ) ejerce sobre él. Según la ley de la gravitación de Newton,  $F = G \cdot M \cdot m / r^2$ , siendo  $r$  la distancia entre el centro de la Tierra y el objeto, es decir,  $r =$  radio de la Tierra, pues suponemos que el objeto de masa  $m$  está muy próximo a la superficie terrestre.

La primera ley de la Mecánica nos dice que cualquier fuerza ( $F$ ) va a provocar una aceleración ( $a$ ) en el objeto de masa  $m$ , dada por  $F = m \cdot a$ , en nuestro caso,  $F = m \cdot g$

$$\text{Igualando } F = G \cdot M \cdot m / r^2 = m \cdot g \rightarrow M = g \cdot r^2 / G$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \quad r = 6.371 \text{ km} = 6,371 \cdot 10^6 \text{ m} \quad g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$M_{\text{Tierra}} = 9,8 \cdot (6,371 \cdot 10^6)^2 / 6,67 \cdot 10^{-11} = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

### Ejercicio 10.7

Para la Luna también es posible aplicar el mismo procedimiento, puesto que los astronautas que viajaron a nuestro satélite pudieron medir la aceleración de la gravedad allí:  $g = 1,625 \text{ m/s}^2$ .

Ahora  $M$  es la masa de la Luna,  $m$  es la del objeto que se deja caer sobre su superficie y el radio es  $r = 1.738 \text{ km} = 1,738 \cdot 10^6 \text{ m}$

- Calcula la masa de la Luna
- ¿Cuántas veces es mayor la masa de la Tierra que la de la Luna?

Haz clic [aquí](#) para ver la solución.

### Júpiter

Un satélite orbita alrededor de su planeta debido también a la fuerza de atracción gravitatoria  $F = G \cdot M \cdot m / r^2$ , donde  $M$  es la masa del planeta,  $m$  la del satélite y  $r$  es la distancia entre ambos (o sea el radio de la órbita del satélite). El tirón gravitatorio del planeta hace que la trayectoria del satélite se curve continuamente de forma que describe una elipse, generalmente casi una circunferencia.

Y la aceleración centrípeta en un movimiento circular y uniforme viene dada por la fórmula  $a = m \cdot v^2 / r$  siendo  $v$  la velocidad lineal del satélite. La fuerza que provoca esa aceleración centrípeta es, de nuevo,  $F = m \cdot a$

$$\text{Igualando ambas fuerzas: } G \cdot M \cdot m / r^2 = m \cdot v^2 / r$$

Las masas  $m$  del satélite se pueden cancelar y podemos despejar  $M$ , la masa del planeta:

$$M = v^2 \cdot r / G$$

$v =$  velocidad lineal  $= 2 \cdot \pi \cdot r / T$  siendo  $T$  el periodo del satélite medido en segundos.

$$\text{Así que, } M = (2 \cdot \pi \cdot r / T)^2 \cdot r / G = 4 \cdot \pi^2 \cdot r^3 / (T^2 \cdot G)$$

Para Io, los datos son estos:

Radio de su órbita  $r = 421.600 \text{ km} = 4,216 \cdot 10^8 \text{ m}$

Periodo  $T = 1,77 \text{ días} = 1,77 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 152.928 \text{ s} = 1,53 \cdot 10^5 \text{ s}$

Resulta  $M_{\text{Júpiter}} = 4 \cdot \pi^2 \cdot (4,21 \cdot 10^8)^3 / ((1,53 \cdot 10^5)^2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11}) = 1,9 \cdot 10^{27} \text{ kg}$

Que es unas 317 veces la masa terrestre.

### Ejercicio 10.8

*El mismo procedimiento puede utilizarse con un planeta y su estrella central, siempre que la masa del planeta sea mucho más pequeña que la de la estrella y que su órbita sea prácticamente circular. Este es el caso del Sol y la Tierra.*

*Otra vez igualando la fuerza de atracción gravitatoria del Sol con la fuerza centrípeta que hace a la Tierra describir su órbita, resulta que  $G \cdot M \cdot m / r^2 = m \cdot v^2 / r$*

*$M =$  masa del Sol,  $m$  la de la Tierra,  $r$  radio de la órbita de la Tierra (distancia media de la Tierra al Sol).*

*Como antes, las masas  $m$  del planeta se cancelan y*

$$M = v^2 \cdot r / G \rightarrow M = (2 \cdot \pi \cdot r / T)^2 \cdot r / G = 4 \cdot \pi^2 \cdot r^3 / (T^2 \cdot G)$$

*Ahora  $r = 150 \cdot 10^6 \text{ km} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$*

*$T = 365,25 \text{ días} = 365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 3,156 \cdot 10^7 \text{ s}$*

*a) Calcula la masa del Sol.*

*b) ¿Cuántas veces mayor es la masa del Sol en comparación con la de la Tierra?*

*Haz clic [aquí](#) para ver la solución.*

# TRABAJOS ESCOLARES

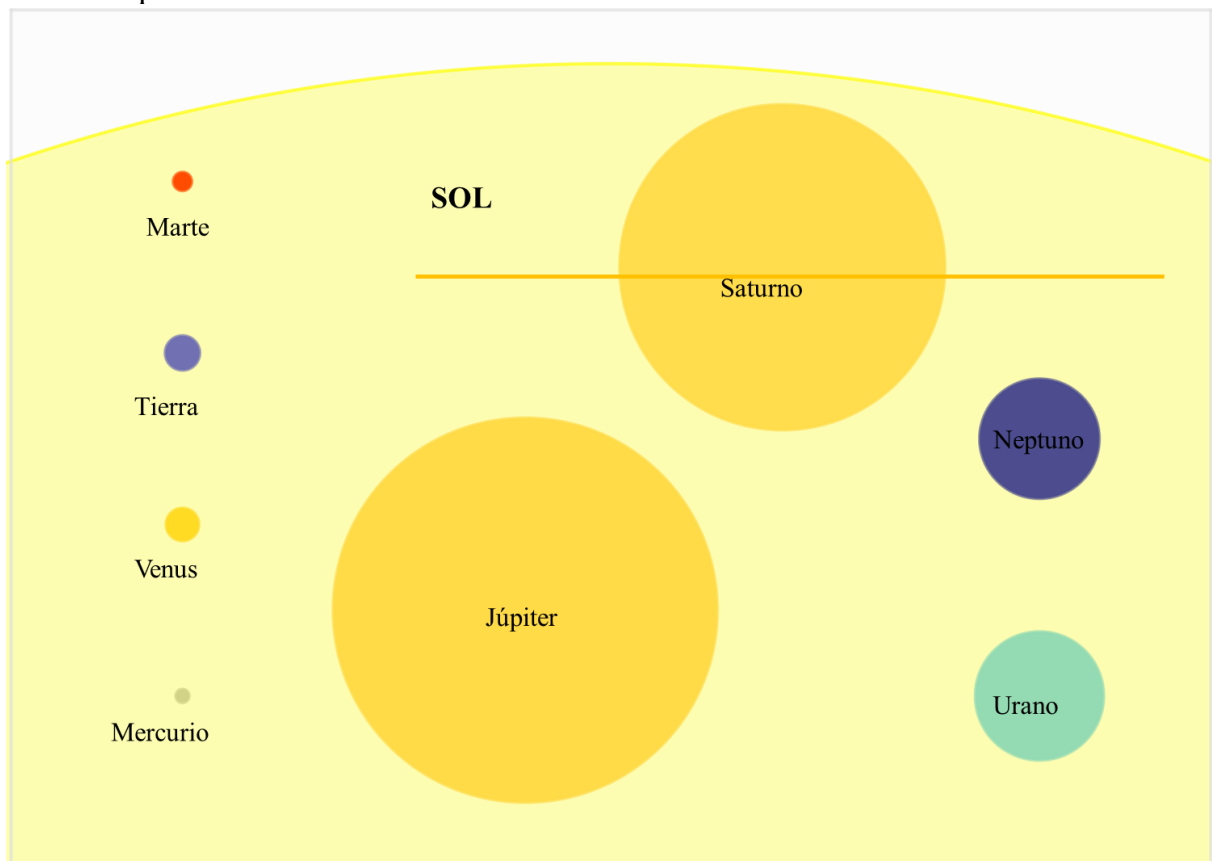
## *Observación del Sol*

Con un telescopio observa **por proyección**, como se muestra en la fotografía, las manchas solares. Nunca se debe mirar al Sol directamente pues puede provocar graves daños en los ojos. Ni siquiera los filtros oscuros (radiografías, películas veladas, cristales ahumados) son totalmente seguros. Es mejor proyectar la imagen del Sol sobre una pantalla y mirar allí la imagen formada.



## *Mural con los planetas a escala de tamaños*

Utilizando los datos del ejercicio 4 puedes dibujar todos los planetas a escala de tamaños. Si utilizas una cartulina de tamaño estándar (50x70 cm) te puede quedar bien haciendo que la Tierra sea un círculo de 1 cm de radio. Puedes asignar a cada planeta el color con el que los vemos desde aquí. También puedes dibujar una parte del Sol, para que se vea lo enorme que es. Tiene que tener un radio de 110 cm.



## Maqueta de los planetas a escala de tamaños

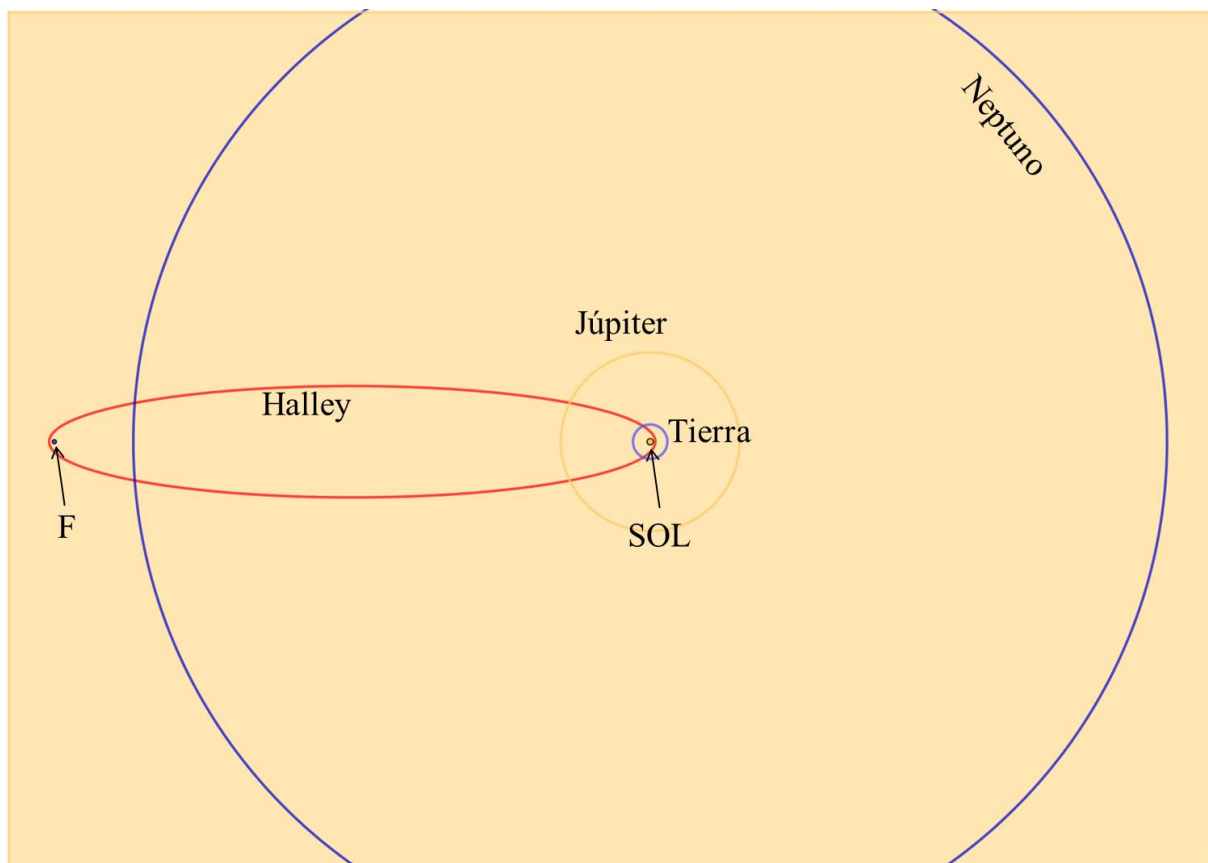
Confeccionar una maqueta con los planetas a escala de tamaños. Puedes utilizar esferas de porexpán o bolas de corcho o plastilina de tamaños adecuados y pintarlas con los colores típicos de cada planeta utilizando témperas. Usa los datos del ejercicio 4.



## Órbita de un cometa

Utilizando el método del jardinero, dibuja la órbita del cometa Halley. Si utilizas una cartulina de 50x70 cm, traza una recta por la mitad y sitúa dos clavos pequeños en S y F, distantes entre sí 34,7 cm. S representa la posición del Sol y F es el otro foco de la elipse. Coloca una cuerda muy fina anudada de forma que encierre los dos clavos; debe medir en total 70,6 cm. Coloca un lápiz en el interior de la cuerda y desplázalo estirando ésta al máximo.

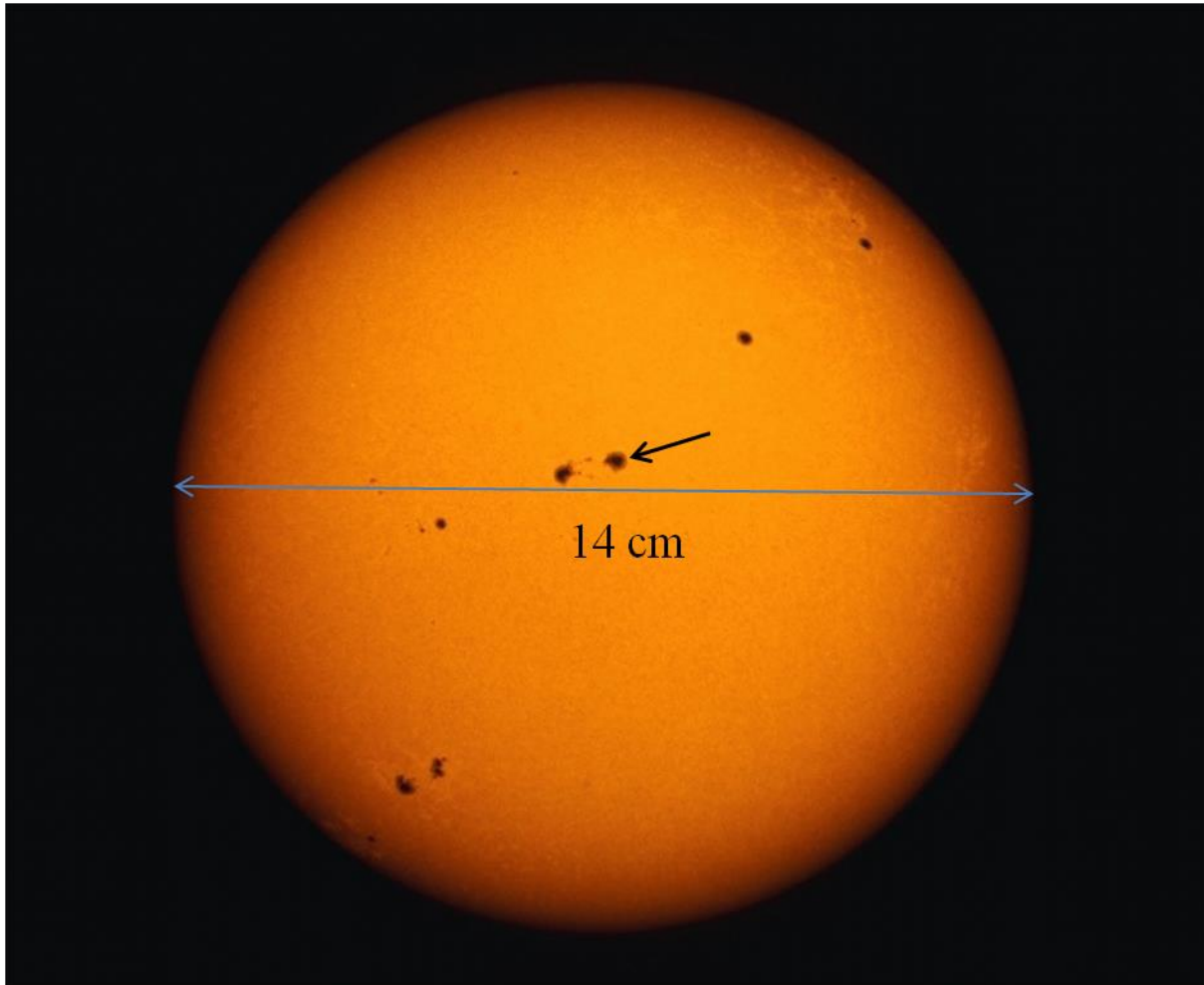
Puedes también dibujar a la misma escala las órbitas de varios planetas como circunferencias con centro en S y con los siguientes radios: 1 cm para la Tierra, 5,2 para Júpiter y 30,1 para Neptuno.





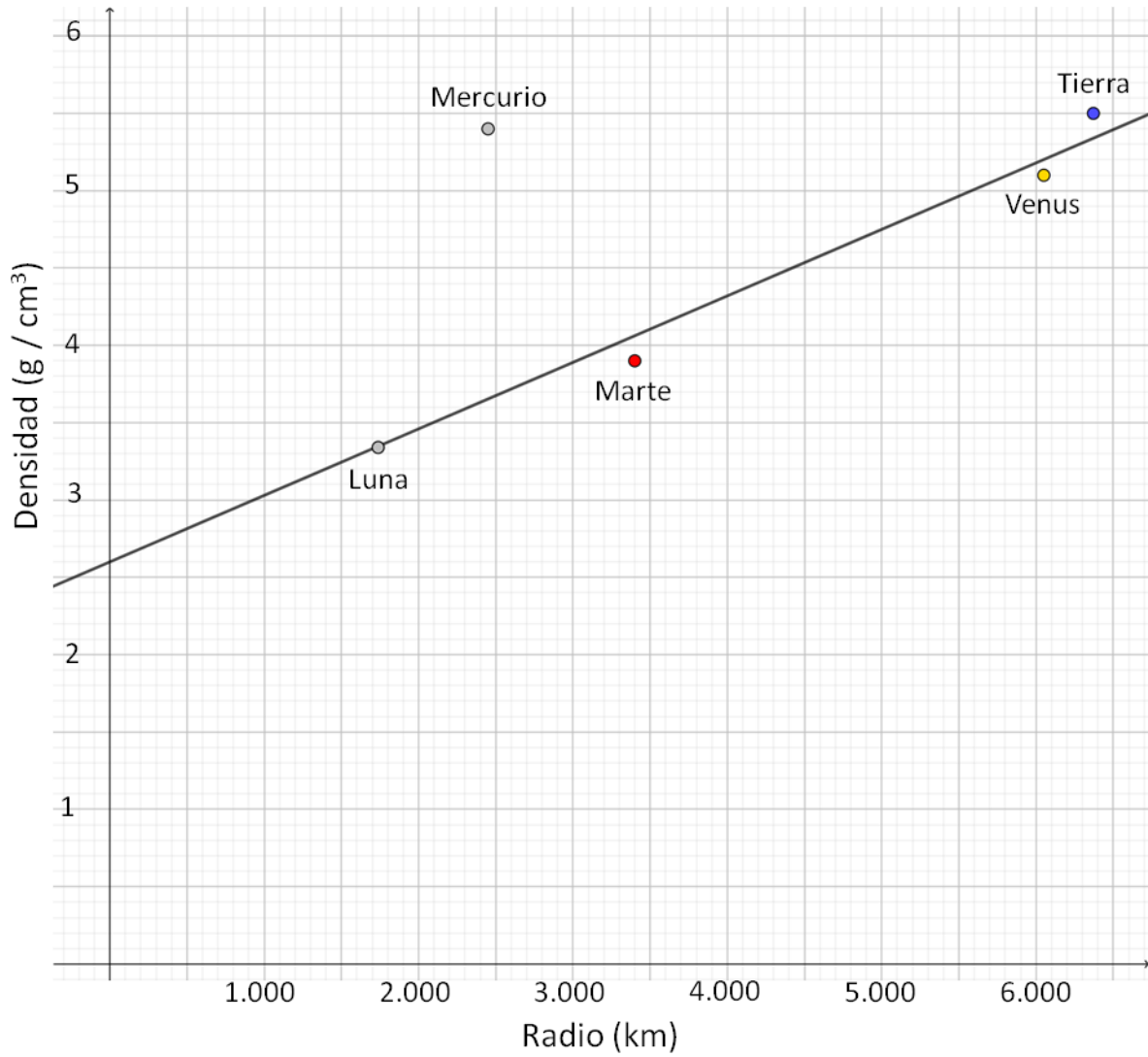
### Ejercicio 10.1

Si se ajusta el tamaño del documento hasta que la imagen del Sol tenga 14 cm de diámetro, entonces la mancha señalada con una flecha mide, aproximadamente, unos 3 mm de diámetro. Como el diámetro del Sol es de 1.400.000 km, entonces 10 cm equivalen a 1.000.000 km, 1 cm a 100.000 km y 1 mm a 10.000 km, por lo que esa mancha medirá realmente unos 30.000 km, es decir más del doble que el diámetro terrestre.



## Ejercicio 10.2

La Tierra, Venus, Marte y la Luna aparecen situados casi en una misma línea recta, pero Mercurio en cambio se separa notablemente de ella. Para que siguiera la misma tónica su densidad debería ser 3,6, cuando en realidad es 5,43, mucho mayor de lo esperado.



### Ejercicio 10.3

El valor relativo de la gravedad de cada planeta respecto a la terrestre es:

Sol	Mercurio	Venus	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno
28	0,38	0,91	0,38	2,73	1,15	0,92	1,15

Suponiendo que peses 60 kilos, en Mercurio serían 23 kilos, en Júpiter 164 y en el Sol nada menos que 1.679 kilos.

### Ejercicio 10.4

Los radios de cada planeta comparados con el terrestre serían:

Mercurio	Venus	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno
38%	95%	53%	11,2	9,14	3,98	3,86

En una maqueta a escala con una bola de 10 cm de diámetro para la Tierra, los diámetros de los demás planetas son:

Mercurio	Venus	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno
3,8	9,5	5,3	112	91,4	39,8	38,6

### Ejercicio 10.5

Los volúmenes, en relación al terrestre, resultan ser:

Mercurio	Venus	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno
6%	86%	15 %	1.413	764	63,1	57,7

### Ejercicio 10.6

Las masas de cada planeta en comparación con la de la Tierra son estas:

Mercurio	Venus	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno
5,5 %	81,7 %	10,7 %	344	95,8	14,57	17,2

### Ejercicio 10.7

De nuevo  $F = G \cdot M \cdot m / r^2 = m \cdot g \rightarrow M = g \cdot r^2 / G$

a)  $M_{\text{Luna}} = 1,625 \cdot (1,738 \cdot 10^6)^2 / 6,67 \cdot 10^{-11} = 7,36 \cdot 10^{22} \text{ kg}$

b)  $M_{\text{Tierra}} / M_{\text{Luna}} = 6 \cdot 10^{24} / 7,36 \cdot 10^{22} = 81$

### Ejercicio 10.8

a)  $M_{\text{Sol}} = 4 \cdot \pi^2 \cdot (1,5 \cdot 10^{11})^3 / ((3,156 \cdot 10^7)^2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11}) = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

b) Equivalente a unas 333.000 veces la  $M_{\text{Tierra}}$ .