

COLABORACIONES EN MATEMÁTICAS

MISIÓN CASSINI-HUYGENS:
EXPLORANDO SATURNO Y SUS SATÉLITES
A 1500 MILLONES DE KILÓMETROS

INTRODUCCIÓN

El día 15 de septiembre de 2017, la nave espacial *Cassini* se sumergió en la atmósfera de Saturno para su destrucción. Terminaba así un viaje de 19 años y 331 días desde que fue lanzada al espacio el 15 de octubre de 1997 desde Cabo Cañaveral. De esos casi 20 años, 13 de ellos los pasó orbitando el planeta Saturno y aproximándose a algunos de sus principales satélites, obteniendo una abundante y valiosa información que ha permitido conocer mejor el planeta, sus anillos y sus grandes satélites, además de descubrir varias nuevas lunas muy pequeñas.

La misión *Cassini-Huygens* ha sido un proyecto conjunto de varias agencias espaciales: NASA, ESA (Agencia Espacial Europea) y ASI (Agencia Espacial Italiana). Además han participado equipos de científicos y técnicos de diecisiete países en el diseño, la construcción, el vuelo y la recogida de datos.

Para la misión se construyeron dos sondas distintas: el orbitador *Cassini* y la sonda *Huygens*, cuyo objetivo era alcanzar la superficie de Titán y estudiar su atmósfera. En conjunto, la misión *Cassini-Huygens* es una de las de mayor éxito científico de toda la Era Espacial.

CASSINI Y HUYGENS

Son los nombres de dos importantes astrónomos del siglo XVII relacionados con el planeta Saturno. Giovanni Domenico Cassini (1625-1712), que fue el primer director del Observatorio de París desde 1671, descubrió cuatro satélites de Saturno: Jápeto en 1671, Rea en 1672, Tetis en 1684 y el mismo año Dione. En 1675 descubrió el espacio vacío entre los anillos A y B, que es denominado en su honor la división de Cassini.

Cristiaan Huygens (1629-1695) descubrió Titán, el mayor satélite de Saturno, en 1655. Fue el primero en

explicar la naturaleza de un extraño objeto que rodeaba la imagen de Saturno vista con la poca resolución de los telescopios de la época. Huygens lo identificó correctamente como un anillo. En 1659 publicó *Systema Saturnium* donde explicó las fases y los cambios que se observaban en la forma de ese anillo visto desde la Tierra.

SATURNO Y SUS SATÉLITES

Saturno es el sexto planeta del sistema solar en cuanto a su distancia al Sol. Esta distancia varía de 9.04 a 10.1 Unidades Astronómicas. Recordemos que una Unidad Astronómica, UA, es aproximadamente 150 millones de km (149597870.7 km). Las distancias entre la Tierra y Saturno estuvieron comprendidas entre 8.2 y 10.2 UA durante la estancia de *Cassini* en los alrededores del planeta, lo que supuso que las señales de radio enviadas desde la sonda y hacia ésta tardaron entre 68 y 84 minutos, por lo que era imposible actuar sobre la nave en tiempo real.

Saturno es un planeta gigante gaseoso de 120536 km de diámetro ecuatorial y 108728 km de diámetro polar, siendo el planeta que presenta el mayor achatamiento, 0.098, de todos los planetas del sistema solar. Tiene un volumen equivalente a 764 veces el de la Tierra y una masa de 95,8 veces la masa terrestre, por lo que la densidad resulta ser de 0.69, inferior a la del agua.

El planeta gira a gran velocidad, aunque inferior a la velocidad de giro de Júpiter. Saturno da una vuelta sobre sí mismo en 10 horas 39 minutos y 22 segundos. La inclinación de su eje giro respecto al plano de su órbita, $26^{\circ}73'$, es sólo un poco mayor que en el caso de la Tierra. Por tanto, presenta estaciones como la Tierra, aunque en Saturno duran mucho más, ya que un año allí corresponde a 29.42 años terrestres.

Se conocen 62 satélites de Saturno, de los cuales 53 tienen nombre propio asignado. Es de destacar que hasta el año 2004, cuando *Cassini* llegó al planeta, habían sido descubiertos solamente 31 satélites.

Hay once satélites con un diámetro superior a los 100 km. De éstos, cinco tienen un diámetro superior a los 1000 km, siendo por tanto mayores que el planeta enano Ceres (el primer asteroide descubierto) que mide 975 km.

El mayor satélite es Titán con 5149 km, lo que le convierte en el segundo satélite en tamaño del sistema solar, siendo superado por poco por Ganimedes, un satélite de Júpiter que mide 5262 km. Ambos satélites son más grandes que el planeta Mercurio, cuyo diámetro es de 4879 km.

La característica más espectacular y conocida de Saturno es su espléndido sistema de anillos. Galileo Galilei fue la primera persona conocida en ver los cielos a través de un telescopio. En 1610 descubrió las cuatro lunas más grandes de Júpiter. Saturno está casi al doble de distancia del Sol, pero los anillos de Saturno son tan grandes y brillantes que Galileo los descubrió ese mismo año.

La nave *Cassini* es la cuarta que explora Saturno. Anteriormente, el planeta fue observado por las sondas *Pioneer 11* en septiembre de 1979, *Voyager 1* en noviembre de 1980 y *Voyager 2* en agosto de 1981. Aunque el tiempo de observación del planeta en estos vuelos de aproximación fue relativamente corto, los datos obtenidos proporcionaron abundantes sorpresas científicas y suscitaban muchas preguntas que la misión *Cassini-Huygens* ha tratado de contestar.

OBJETIVOS DE LA MISIÓN

Los principales objetivos iniciales de la misión *Cassini-Huygens* eran los siguientes. Respecto a Saturno: determinar la estructura tridimensional y el comportamiento dinámico de sus anillos y de su magnetosfera y estudiar la atmósfera del planeta. Respecto a sus satélites: estudiar la atmósfera de Titán y cartografiar su superficie y determinar la naturaleza y el origen del material oscuro de la superficie de Jápeto.

Para conseguir esos objetivos, *Cassini* llevaba doce instrumentos. Por su parte, *Huygens* llevaba otros seis instrumentos más.

Aparte de los casi siete años de viaje hasta llegar a Saturno, la misión original estaba prevista que durara tres años. Posteriormente, se aprobaron dos extensiones de la misión que se detallan más adelante.

EL VIAJE HASTA SATURNO

El viaje duró, como se ha indicado antes, casi 7 años. Puesto que la nave no llevaba un motor que la impulsara, el viaje se hizo aprovechando los impulsos proporcionados por la gravedad de varios planetas. Hubo dos

vuelos de aproximación a Venus. Durante el primero, *Cassini* se acercó hasta 283 km de la superficie de ese planeta en abril de 1998. Una segunda aproximación tuvo lugar en junio de 1999, pasando a 6052 km de distancia mínima. En agosto de ese año la nave se aproximó al sistema Tierra-Luna llegando a acercarse hasta 1171 km de la Tierra.

Con estas maniobras tipo honda, la nave adquirió el impulso suficiente para dirigirse hacia Júpiter, atravesando en su recorrido el cinturón de asteroides. Durante esta etapa, en enero de 2000, llegó a estar a poco más de 1600000 km del asteroide 2685-Masursky. Pudo medir el diámetro de este asteroide, que resultó ser de 15-20 km.

La máxima aproximación a Júpiter se produjo en diciembre de 2000, cuando *Cassini* pasó a menos de 10 millones de km del planeta. Por esa época la nave *Galileo* estaba estudiando el sistema de Júpiter y sus satélites.

CASSINI EN SATURNO: MISIÓN ORIGINAL

Cassini llegó a Saturno y comenzó a orbitar alrededor del planeta el 1 de julio de 2004 dando comienzo a la fase de investigación inicialmente prevista. Una serie de vuelos sobre Titán permitieron realizar los necesarios cambios de órbita para aproximarse a diferentes satélites y para estudiar Saturno y sus anillos desde distintas inclinaciones de la órbita.

El 25 de diciembre de 2004 la sonda *Huygens* se separó de la *Cassini* iniciando su aproximación a Titán, donde aterrizó el 14 de enero de 2015. Durante la caída sobre la superficie del satélite, frenada por un paracaídas, estudió la atmósfera del satélite. *Huygens* envió numerosas fotografías del terreno alrededor del punto donde aterrizó.

Un fallo en el diseño del sistema de comunicaciones entre las dos sondas pudo haber sido fatal para la recepción de los datos obtenidos por la *Huygens* en Titán. Afortunadamente, el fallo se detectó mucho antes y debido a la larga duración del viaje se pudo estudiar cómo solucionar el problema. A pesar de ello, sólo pudo obtenerse la mitad de las fotografías previstas.

EXTENSIONES DE LA MISIÓN

La misión de *Cassini* ha sido extendida en dos ocasiones, lo que ha permitido realizar más vuelos, investigaciones

y mediciones a lo largo de un período de tiempo mucho más largo.

El 5 de abril de 2008 la misión fue extendida durante 27 meses más, siendo aprobados los correspondientes fondos para ello. Durante esa primera misión extendida, la nave espacial hizo 60 órbitas adicionales de Saturno, 26 vuelos sobre Titán, siete a Encélado y uno a cada uno de los satélites Dione, Rea y Helena. También permitió observar los anillos de Saturno mientras el Sol los iluminaba de canto, revelando una multitud de detalles nunca vistos antes sobre la estructura de los mismos.

La misión comenzó el 1 de julio de 2008 y fue denominada *Cassini Equinox Mission*, ya que durante ese nuevo periodo, el 10 de agosto de 2009, se produciría el equinoccio de invierno en Saturno. Como se indicó antes, el eje de Saturno está inclinado con respecto a su órbita alrededor del Sol, por tanto, Saturno tiene estaciones como resultado de esta inclinación. Pero en Saturno, una estación dura algo más de siete años terrestres.

En febrero de 2010 se aprobó una segunda extensión para el periodo comprendido desde septiembre de 2010 hasta mayo de 2017. En este tiempo, *Cassini* debería realizar otras 155 órbitas alrededor de Saturno, 54 nuevas aproximaciones a Titán y 11 vuelos a Encélado para estudiar más detenidamente estos dos satélites. Esta extensión se denominó *Cassini Solstice Mission*, ya que se el solsticio de verano en Saturno tendría lugar el 24 de mayo de 2017. Con estas dos extensiones se ha podido estudiar un periodo completo estacional.

El 22 de abril de 2017, un vuelo de aproximación a Titán cambió la órbita de *Cassini* permitiendo que la nave pasara a través del hueco entre las capas superiores de la atmósfera de Saturno y el anillo más interior, el anillo F. Hubo un total de 22 vuelos entre las nubes de Saturno y el anillo interior antes de que una aproximación final a Titán el 12 de septiembre impulsó a *Cassini* hacia la atmósfera del planeta para su total destrucción el 15 de septiembre.

DESCUBRIMIENTOS Y RESULTADOS CIENTÍFICOS OBTENIDOS

Es imposible reseñar aquí todos los logros científicos y los inesperados descubrimientos que ha proporcionado la misión. Destacaremos solamente algunos de los más importantes. Este epígrafe es una traducción propia resumida de los contenidos en los diversos apartados de la

pestaña Science dentro de la página <https://saturn.jpl.nasa.gov>.

Antes de *Cassini*, sólo se tenía una idea de los descubrimientos que esperaban en Saturno. Las naves *Pioneer 11* y *Voyagers 1* y *2* se aproximaron a Saturno a bastante distancia hace décadas, tomando fotografías, y haciendo mediciones y observaciones a medida que pasaban. Estas misiones arrojaron nueva luz sobre el complicado sistema de anillos de Saturno, descubrieron nuevas lunas e hicieron las primeras mediciones de la magnetosfera de Saturno. Pero estos encuentros relativamente rápidos no permitieron tiempo para una investigación científica más extensa.

Cassini comenzó el primer estudio en profundidad y de cerca de Saturno y su sistema de anillos y lunas en 2004. Se convirtió en la primera nave espacial en orbitar Saturno, comenzando una misión que ha proporcionado multitud de datos durante más de una década. Este sistema planetario ha resultado ser un terreno rico para la exploración y los descubrimientos, y los hallazgos científicos de *Cassini* han cambiado el curso de la exploración planetaria futura.

Los datos de la nave espacial *Cassini* y la sonda *Huygens* de la Agencia Espacial Europea, que se hundió en la densa atmósfera de Titán para aterrizar en su superficie en 2005, han generado cientos de artículos científicos y han sido objeto de números especiales de las revistas científicas más importantes del mundo.

Algunos de los descubrimientos científicos más sorprendentes han venido de encuentros con las fascinantes y dinámicas lunas de Saturno. Las observaciones de *Cassini* de la luna más grande de Saturno, Titán, han dado a los científicos un vistazo de lo que la Tierra podría haber sido antes de que la vida evolucionara. Ahora creen que Titán posee muchos elementos atmosféricos y orográficos parecidos a los de la Tierra, incluyendo lagos, ríos, canales, dunas, lluvia, nubes, montañas y posiblemente volcanes, aunque la naturaleza de todos ellos es muy distinta a sus contrapartes terrestres.

Encélado, también, resultó ser una rica fuente de descubrimientos. El rocío de partículas heladas arrojadas por sus géiseres forma una columna tres veces más alta que la anchura del propio Encélado. *Cassini* confirmó que estas partículas alimentan el anillo más extenso de Saturno, el anillo E. La nave espacial se ha acercado hasta 25 km de la superficie helada de la luna durante su

investigación, revelando la presencia de un océano subterráneo global.

Saturno

Antes de *Cassini*, los científicos vieron las características únicas de Saturno sólo desde la Tierra y desde unos pocos vuelos espaciales anteriores. Pero durante más de una década orbitando el planeta, *Cassini* estudió la composición y temperatura de la atmósfera superior de Saturno a medida que las estaciones cambiaban allí. *Cassini* también proporcionó observaciones de cerca de las tormentas exóticas de Saturno y corrientes de chorro, y las ondas de radio y plasma de Saturno, que no pueden ser detectadas desde la Tierra.

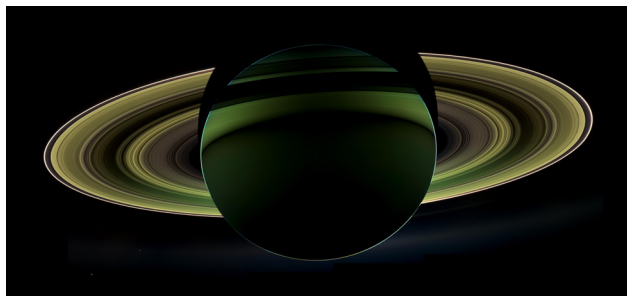


Figura 1. Imagen de Saturno. Fuente: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute.

Cassini tomó imágenes de relámpagos, tanto en el lado nocturno de Saturno como en el diurno, los cuales nunca se habían fotografiado antes. La tormenta de Saturno de 30 años (o tormenta anual para Saturno), apareció 10 años antes de lo habitual, permitiendo a *Cassini* estudiar el fenómeno de cerca durante su misión.

Saturno puede ser conocido por sus anillos, pero el planeta en sí mismo ofrece otros temas inagotables para el estudio. Su volumen es más de 700 veces el de la Tierra, pero se cree que su núcleo es sólo un poco más grande que ésta. El resto es una atmósfera de hidrógeno mezclado con helio y otras moléculas.

Aunque Saturno y la Tierra son dos planetas tan diferentes, ambos tienen algunas similitudes, una de las cuales es la presencia de corrientes de chorro. Sin embargo, el chorro más famoso y visible de Saturno es muy diferente al de la Tierra. Se llama el hexágono.

El chorro hexagonal alrededor del polo norte de Saturno fue observado por primera vez por la misión *Voyager* a principios de los años ochenta. *Cassini* empezó a estudiarlo durante el invierno del hemisferio norte de Saturno, cuando el hexágono estaba en sombra. En

ese momento, *Cassini* observó el gran chorro de seis lados en el infrarrojo, percibiendo el calor que venía de dentro del planeta. Más adelante, cuando el hemisferio norte de Saturno entró en la primavera, *Cassini* pudo observar el hexágono en longitudes de onda visibles de luz, revelando una forma sorprendentemente simétrica de casi 14000 km de lado con vientos de alrededor de 322 km/h.

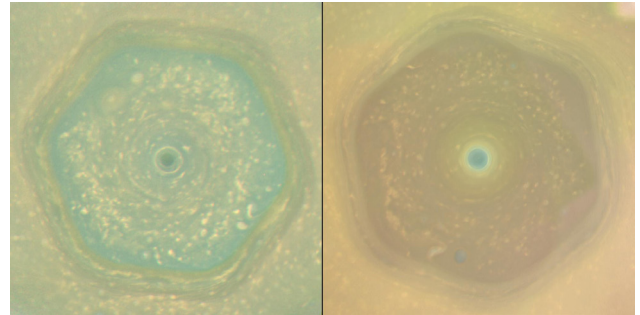


Figura 2. Cambios de color en el hexágono, 2013 y 2017. Fuente: NASA/JPL-Caltech/SSI/Hampton University.

Anillos

En los 400 años desde el descubrimiento de Galileo, los anillos se han convertido en el rasgo revelador de Saturno y son quizás la característica más conocida de cualquier mundo en nuestro sistema solar. *Cassini* ha pasado más de una década examinándolos más de cerca que cualquier otra nave espacial. *Cassini* ha visto cómo algunas de las lunas de Saturno recibían partículas procedentes de los anillos, mientras que otras aportaban partículas a éstos.

Junto con Saturno y sus lunas, los anillos son uno de los tres componentes primarios del sistema Saturno. Los anillos generalmente tienen aproximadamente 10 metros de grosor y están casi completamente compuestos de miles de millones (si no trillones) de trozos de hielo de agua, que varían en tamaño desde un grano de arena hasta el tamaño de una montaña.

Cassini estudió los rasgos en los anillos de Saturno llamados “radios”, que pueden ser más largos que el diámetro de la Tierra. Los científicos creen que están hechos de diminutas partículas heladas que son levantadas por una carga electrostática y sólo duran unas pocas horas.

Durante el equinoccio de Saturno, cuando los anillos son iluminados de canto por la luz solar, *Cassini* vio cómo las partículas de anillo producían sombras alargadas que revelaban trozos de anillo inesperadamente inmensos que medían kilómetros de tamaño.

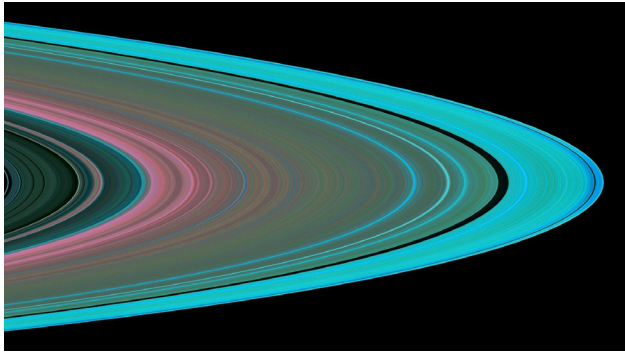


Figura 3. Imagen en falso color de los anillos. Fuente: NASA/JPL.

Ningún otro planeta en nuestro sistema solar tiene un sistema de anillos tan espléndido como el de Saturno. La misión de *Cassini* ha ayudado a los científicos a comprender algunas de las extrañas conductas de los anillos y a observar algunas nuevas.

Para comprender mejor el tamaño y la distribución de las partículas del anillo, así como su composición, *Cassini* ha estudiado cómo la luz de las estrellas lejanas cambia al pasar por los anillos, y cómo la luz de nuestra propia estrella se refleja en ellos.

Cassini descubrió que gran parte del material para el anillo E de Saturno -un anillo difuso fuera de los brillantes anillos principales- proviene de la luna Encélado, que está arrojando partículas heladas y gas hacia el espacio a medida que orbita a Saturno.

Cassini también descubrió estructuras que parecen hélices, que a veces tienen varios miles de kilómetros de longitud. Los instrumentos de la nave espacial observaron por primera vez esas formaciones en 2006. Las hélices son producidas por la influencia gravitacional de unos pequeños cuerpos que llamaremos lunetas, que son como terrones de material de los anillos. Se estima que miden alrededor de un 1 km de diámetro, por tanto son más pequeñas que una luna pero más grandes que las partículas individuales de los anillos. Las lunetas lanzan las partículas circundantes del anillo cientos de metros por encima y por debajo del anillo, produciendo las características que *Cassini* fotografió.

Las partículas del anillo se elevan de la misma manera que un barco en movimiento crea una estela. Las más cercanas a Saturno se mueven más rápido que la luneta mientras que las más lejanas se mueven más despacio que la luneta, y por interacción gravitatoria, se forma una especie de onda tanto detrás como delante de la luneta a medida que ésta orbita. Estas estructuras aunque se asemejan a las hélices, en realidad no rotan.

Ya que el eje de rotación de Saturno está inclinado, durante medio año de Saturno, el planeta parece inclinarse hacia el Sol, que ilumina la parte superior de los anillos y durante la otra mitad del año el Sol ilumina el polo sur de Saturno y la parte inferior de los anillos. Sin embargo, durante dos breves períodos en cada una de las órbitas de Saturno alrededor del Sol, el borde del anillo apunta directamente hacia el Sol. Este evento, llamado equinoccio, da a los hemisferios norte y sur de Saturno la misma cantidad de luz solar por un breve tiempo. Pero Saturno tarda alrededor de 30 años terrestres para completar una órbita, así que su equinoccio ocurre sólo una vez cada 15 años.

De la misma manera que un objeto al atardecer puede tener una sombra muchas veces más larga que su altura real, el equinoccio de Saturno produjo sombras que magnificaron los rasgos del anillo que habían sido demasiado sutiles para ser observados en otras condiciones.

Durante el equinoccio, *Cassini* también pudo medir la temperatura de los anillos con un espectrómetro infrarrojo, ya que la temperatura ayuda a entender la composición, tamaño, forma y otras características de las partículas del anillo. Debido a que la luz del Sol golpeaba los anillos en sus bordes en vez de en su cara ancha, las temperaturas en los anillos cayeron por abajo de lo que nadie había registrado antes. *Cassini* vio el anillo A, por ejemplo, enfriarse a menos 230 grados centígrados.

Además, *Cassini* utilizó el equinoccio para observar algunos fenómenos conocidos que son mal comprendidos. Una de esas características son los "radios". Vistos por primera vez por la nave espacial *Voyager* en los años ochenta, los radios se denominan así porque recuerdan los radios en una rueda y se cree que están hechos de diminutas partículas de hielo que se elevan sobre la superficie de los anillos por una carga electrostática, de igual manera que un globo cargado estáticamente sostenido sobre la cabeza de una persona levanta sus cabellos, pero en una escala asombrosa. Los radios pueden ser mayores de 16.000 km, por tanto, mayores que el diámetro de la Tierra, pero a pesar de su tamaño pueden formarse y luego desaparecer en un periodo de horas.

Satélites

Titán

Antes de que *Cassini-Huygens* comenzara su estudio centrado en el satélite más grande de Saturno, se sabía

que Titán era una bola naranja nebulosa del tamaño de Mercurio. Se había determinado que tenía una atmósfera de nitrógeno, el único mundo conocido con una densa atmósfera de nitrógeno además de la Tierra. Pero lo que estaba debajo de las nubes de niebla era un misterio.

La nave espacial *Cassini* de la NASA completaría con el tiempo más de 100 vuelos a Titán, enviando la sonda *Huygens* de la Agencia Espacial Europea para aterrizar allí, el primer aterrizaje en una superficie del sistema solar exterior. Durante el descenso de dos horas y media, *Huygens* tomó medidas de la composición atmosférica de Titán y fotografió su superficie. La robusta sonda no sólo sobrevivió al descenso y al aterrizaje, sino que continuó transmitiendo datos durante más de una hora en la superficie helada de Titán, hasta que se agotaron las baterías.



Figura 4. Superficie de Titán. Fuente: ESA/NASA/JPL/University of Arizona.

Desde ese momento histórico en 2005, se han analizado multitud de datos sobre Titán, enviados a la Tierra por *Huygens* y *Cassini*. La información recopilada por las dos naves espaciales ha revelado muchos detalles de un mundo sorprendente y ha planteado fascinantes nuevas cuestiones para su estudio futuro.

Ahora sabemos que Titán es un mundo con lagos y mares compuestos de metano líquido y etano cerca de sus polos, con vastas y áridas regiones de dunas ricas en hidrocarburos rodeando su ecuador. Y bajo la superficie, Titán alberga un gran océano interno.

Titán es el único otro lugar en el sistema solar que se sabe que tiene un ciclo de líquidos similares a la Tierra que fluyen a través de su superficie en función de sus estaciones. Cada estación de Titán dura unos 7,5 años terrestres. Desde 2011, *Cassini* ha estado viendo la transición de otoño a invierno en el polo sur de Titán y observando como el verano llega al norte.

Las dunas de arena ondulantes, como las de algunos desiertos de la Tierra, se pueden ver en las oscuras regiones ecuatoriales de Titán. Los científicos creen que la arena no está hecha de silicatos como en la Tierra, sino de hielo de agua sólida cubierto con hidrocarburos que caen de la atmósfera. Las imágenes muestran que las dunas heladas de Titán son gigantescas, alcanzando, en promedio, de 1 a 2 km de ancho, cientos de kilómetros de largo y alrededor de 100 metros de alto.

La variedad de características en la superficie de Titán ha sorprendido mucho. Es intrigante la cantidad de rasgos de la superficie de Titán que son notablemente parecidos a la Tierra incluyendo los ríos de hidrocarburos, lagos y mares y dunas ecuatoriales, con metano líquido jugando el papel en Titán que el agua juega en la Tierra.

La sonda *Huygens* hizo las primeras mediciones directas de la baja atmósfera de Titán. Los datos enviados por la sonda incluían perfiles de altitud de los constituyentes gaseosos, relaciones isotópicas y trazas de diversos gases (incluidos compuestos orgánicos). Los instrumentos también tomaron muestras directas de aerosoles en la atmósfera y confirmaron que el carbono y el nitrógeno son sus principales constituyentes.

Cassini continuó las mediciones de *Huygens* desde el espacio, detectando otros compuestos químicos que incluyen propileno (usado para hacer plásticos domésticos) y cianuro de hidrógeno, en la atmósfera de Titán. La variedad de productos químicos observados indica una

química rica que se origina a partir del metano y del nitrógeno y que evoluciona en moléculas complejas, formando eventualmente la niebla que rodea la luna helada. Se cree que el metano y la lluvia de etanol caen de las nubes en la atmósfera de Titán, pero la fuente última del metano aún no está clara.

Las numerosas mediciones gravimétricas de *Cassini* de Titán revelaron que este satélite esconde bajo su superficie un océano interno de agua líquida y amoníaco. *Huygens* también midió señales de radio durante su descenso que sugirieron fuertemente la presencia de un océano 55 a 80 km bajo la superficie de la luna.

Encélado

Antes de que *Cassini* llegara al sistema Saturno, sólo se tenían indicios de que algo interesante podría estar sucediendo en Encélado. Las imágenes tomadas por las *Voyager* en los años ochenta indicaron que aunque este satélite es pequeño, 504 km de diámetro, su superficie helada es notablemente lisa en algunos lugares, y blanca y brillante por todas partes. De hecho, es el cuerpo más reflectante del sistema solar.

Fueron los datos del magnetómetro a bordo de la nave espacial *Cassini* los que impulsaron a los científicos a observar más de cerca a Encélado con un sobrevuelo. Algo -quizás una atmósfera- estaba empujando contra el campo magnético de Saturno cerca de Encélado. *Cassini* reveló que Encélado es una luna activa que esconde un océano global de agua salada líquida bajo su corteza. Además, chorros de partículas heladas de ese océano, mezclados con una infusión de agua y compuestos químicos orgánicos, salen continuamente al espacio, mediante géiseres.

El material es disparado a 400 metros por segundo y forma una pluma que se extiende cientos de kilómetros

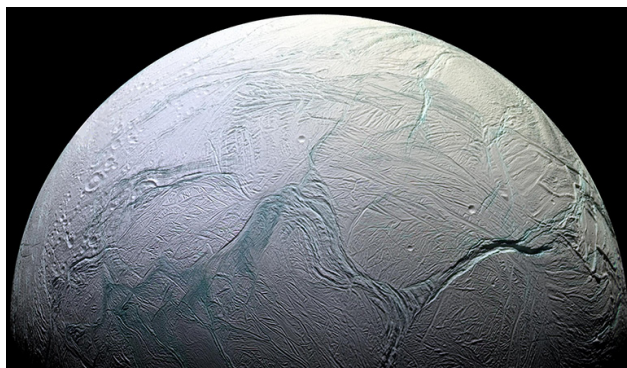


Figura 5. Imagen de la superficie de Encélado. Fuente: NASA/JPL/Caltech Institute.

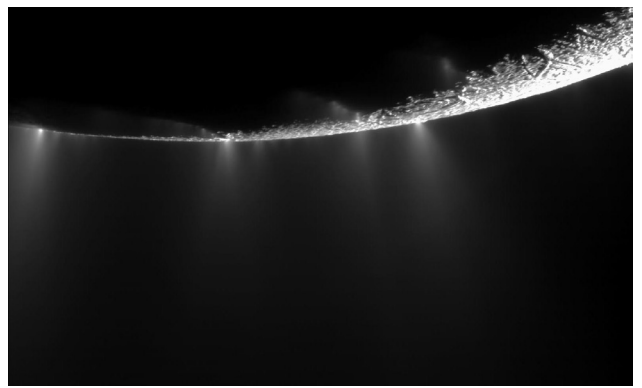


Figura 6. Géiseres de Encélado. Fuente: NASA/JPL/Space Science Institute.

en el espacio. Una parte del material cae de nuevo sobre Encélado, y otra parte sirve para formar el inmenso anillo E de Saturno.

Este anillo está compuesto en su mayor parte por gotas de hielo, pero entre ellas se encuentran nanopartículas peculiares. *Cassini* detectó nanopartículas de sílice, las cuales sólo pueden ser generadas cuando el agua líquida y la roca interactúan a temperaturas por encima de los 90 grados centígrados. Esto apunta a fuentes hidrotermales profundas debajo de la cubierta helada de Encélado.

Estos hallazgos comenzaron a tomar forma en 2005, cuando las cámaras de *Cassini* obtuvieron las primeras imágenes detalladas de la región polar sur de Encélado. Las imágenes revelaron un terreno sorprendentemente joven y complejo, casi completamente libre de cráteres de impacto. El área estaba cubierta de rocas de hielo del tamaño de una casa y superficies talladas por patrones tectónicos únicos en esta región de la luna. Para su asombro, los científicos detectaron una enorme nube de vapor de agua sobre el área y fracturas en la corteza que suministran la nube de vapor de agua y partículas de hielo que se extienden al espacio. El análisis posterior proporcionó evidencia concluyente de que los chorros se originan cerca de los puntos más calientes de las fracturas.

Durante un vuelo cercano en 2008, los instrumentos de *Cassini* estudiaron la pluma directamente y detectaron una sorprendente mezcla de gases volátiles, vapor de agua, dióxido de carbono y monóxido de carbono, así como materiales orgánicos. La densidad de los materiales orgánicos era aproximadamente 20 veces más densa de lo esperado.

Tiempo después, los científicos determinaron que el terreno agrietado que se extiende a través del polo sur

activo de Encélado está en constante movimiento, estirándose en algunos lugares y doblándose en otros por efecto de las fuerzas gravitatorias. Es posible que Encélado sea calentado por un mecanismo de marea similar al que se produce en Io un satélite de Júpiter.

Los científicos descubrieron evidencia del océano interno de Encélado a partir de mediciones de la gravedad basadas en el efecto Doppler y la magnitud del leve bamboleo de la luna a medida que orbita Saturno. Los datos eran consistentes con la existencia de un gran océano global interior. Las mediciones sugirieron un gran mar de 10 km de profundidad debajo de la región polar del sur, bajo una capa de hielo de entre 30 y 40 km de espesor.

Otros satélites

Los vuelos *Voyager* y *Pioneer* de los años setenta y ochenta proporcionaron bosquejos aproximados de las lunas de Saturno. Pero durante sus muchos años en órbita de Saturno, *Cassini* descubrió lunas previamente desconocidas, resolvió misterios sobre las conocidas, estudió sus interacciones con los anillos y reveló lo muy distintas que son las lunas entre sí, tanto en los tamaños, que varían desde las de pocos cientos de metros a más grande que el planeta Mercurio, como en color, textura y composición.

Mimas, tiene un gigantesco cráter denominado Herschel, que hace que el satélite se parezca a la Estrella de la Muerte de "Star Wars". Se encontró evidencia de que

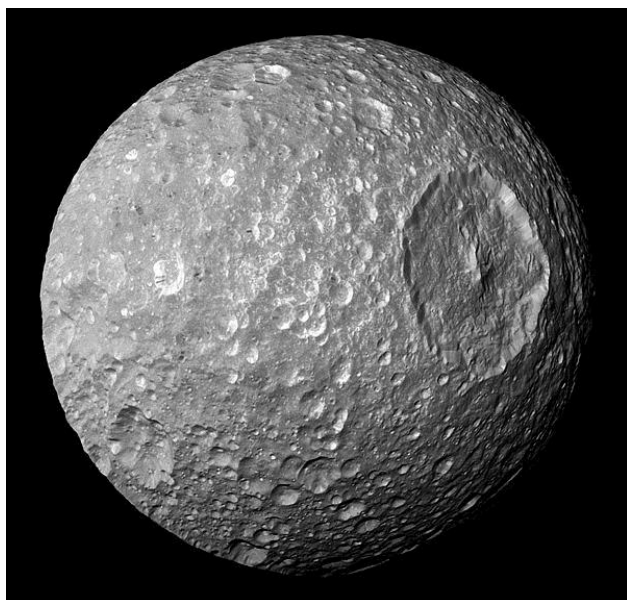


Figura 7. Superficie de Titán. Fuente: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute.

también podría tener un océano subterráneo, o al menos un núcleo de agua-hielo.

Cassini encontró atmósferas delgadas alrededor de las lunas Dione y Rea, alrededor de 5 billones de veces menos densas que en la superficie de la Tierra.

Hiperión acumula una carga estática, que los científicos observaron cuando *Cassini* pasó a través de un haz de electrones que venía de la superficie lunar. Hiperión es el único objeto en el sistema solar, aparte de la Luna, en el que se ha confirmado que tiene una superficie cargada.

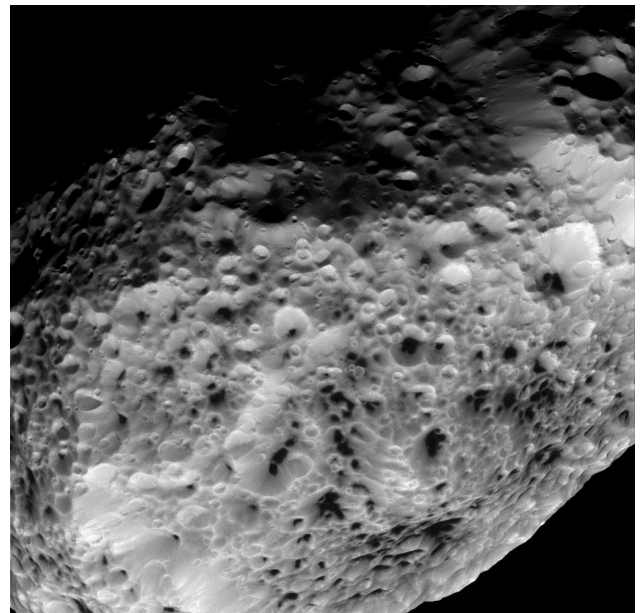


Figura 8. Imagen de Hiperión. Fuente: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute.

Cassini también permitió entender la razón por la que Jápeto tiene un hemisferio blanco como la nieve, mientras que su otro hemisferio es casi tan oscuro como el carbón vegetal. Como en la Luna, el periodo de revolución de Jápeto está sincronizado con el periodo orbital, por lo que siempre muestra el mismo lado a Saturno, y otro parte del satélite siempre mira hacia la dirección en la que está orbitando, por lo que recibe el material oscuro proveniente del anillo de Febe.

En Tetis, *Cassini* observó misteriosos arcos rojos, aunque no eran fáciles de apreciar con luz visible, pero en el infrarrojo son obvios. Los arcos no parecen estar relacionados con ningún rasgo físico de la superficie lunar, como valles o fracturas sino que suben montañas y bajan al fondo de cráteres

Si los arcos rojos provienen de fracturas, éstas son demasiado pequeños para poder ser vistos con la resolu-



Figura 9. Imagen de Jápeto. Fuente: NASA/JPL/Space Science Institute.

ción que proporcionan los instrumentos de *Cassini*. Los arcos también están distribuidos desigualmente en la superficie del satélite, ya que sólo aparecen en el norte.

A medida que los científicos continúen analizando los datos de *Cassini*, probablemente resolverán más misterios sobre la colección de lunas de Saturno, y casi con seguridad encontrarán otros que necesitan ser resueltos.

El equipo de científicos de *Cassini* descubrió siete nuevos satélites. Seis han recibido ya nombre: Metone, Palene, Pólux, Dafnis, Antea y Aegaeon. Un séptimo tiene la denominación provisional de S/2009 S1, que indica que es el primer satélite de Saturno descubierto en el año 2009. Todos ellos son muy pequeños. Sus diámetros van desde alrededor de 1 km (Aegaeon) hasta los 8 km de Dafnis. El séptimo mide alrededor de 300 metros.

La magnetosfera de Saturno

Cuando el viento solar se encuentra con el campo magnético de Saturno, se forma la burbuja protectora de la magnetosfera de Saturno. Fuera de la magnetosfera las fuerzas magnéticas del Sol dominan, mientras que dentro de ella las fuerzas magnéticas de Saturno prevalecen. De modo similar, el campo magnético de la Tierra crea una magnetosfera mucho más pequeña que nos protege de las partículas nocivas emitidas por el Sol y por otros fenómenos celestes.

El campo magnético de Saturno tiene polos norte y sur, como los de una barra magnética, y el campo rota con el planeta. En Júpiter y la Tierra, los campos magnéticos están ligeramente inclinados con respecto a los

ejes de rotación de los planetas - esta inclinación es la razón por la que decimos que las agujas de la brújula apuntan al “norte magnético” en lugar del norte verdadero. Pero el campo magnético de Saturno está casi perfectamente alineado con la rotación del planeta.

Antes de que *Cassini* llegara a Saturno, se tenía un conocimiento pequeño de la magnetosfera de Saturno, gracias a las sondas *Pioneer* y *Voyager* a finales de la década de 1970 y principios de la de 1980. Pero estas naves espaciales -desde la entrada hasta la salida- sólo pasaron unos pocos días en la magnetosfera de Saturno.

Equipado con una serie de instrumentos mucho más capaz y con mucho más tiempo en órbita alrededor de Saturno, *Cassini* ha confirmado algunas de las mediciones anteriores pero también ha revelado algunas diferencias notables. Por ejemplo, las cámaras de *Cassini* han tomado imágenes de auroras formadas por partículas cargadas que chocan contra la atmósfera superior del planeta. Y midiendo el flujo de partículas cargadas alrededor de la nave espacial, *Cassini* ha podido observar cómo los anillos y lunas de Saturno liberan material en la magnetosfera, interactuando con ella y modificándola. Como se indicó antes, las primeras indicaciones de la presencia de géiseres en Encélado fue por observaciones de cómo el campo magnético de Saturno fue alterado.

Además de sus efectos magnéticos, las magnetosferas de los planetas producen ondas de radio. El campo magnético de Saturno es mucho más débil que el de Júpiter, y a diferencia de las emisiones de radio de éste, las señales de radio de Saturno no son lo suficientemente potentes como para ser detectadas desde la Tierra. *Cassini* y la nave espacial previa que visitó Saturno midieron un tipo de emisiones de radio que los científicos habían esperado que revelara el período de rotación del campo magnético de Saturno. Se pensaba que esta tasa de rotación era la verdadera duración del día del planeta, ya que los gigantes del gas no tienen una superficie sólida y sus bandas de nubes se mueven a varias velocidades.

Sorprendentemente, el periodo de rotación medido por *Cassini* fue más lento que el medido 25 años antes por la nave *Voyager*, y el periodo ha variado desde que *Cassini* llegó a Saturno. Dado que una ralentización real de la rotación del planeta gigante es altamente improbable, se han propuesto varias ideas, pero ninguna definitiva, así que aunque las mediciones de *Cassini* han cambiado totalmente nuestra comprensión de la magnetosfera de Saturno, aún quedan muchas preguntas por resolver.

FUTURAS EXPLORACIONES

Hay muchas misiones en estudio o en desarrollo, cuyos objetivos son distintos cuerpos del sistema solar. Aquí sólo vamos a referirnos brevemente a las que tienen una relación más estrecha con lo aprendido con la misión *Cassini-Huygens*.

Europa

La luna de Júpiter Europa ha sido un objetivo principal para futuras exploraciones desde que la misión *Galileo* de la NASA, a finales de los años 90, encontró evidencia contundente de la existencia de un océano global salado de agua líquida bajo su corteza helada. Pero la revelación más reciente de que una luna mucho más pequeña como Encélado también podría tener no sólo agua líquida, sino también energía química que podría potencialmente alimentar la biología, fue asombrosa.

Muchas de las lecciones aprendidas durante la misión de *Cassini* se están aplicando a la planificación de la misión *Europa Clipper* de la NASA, cuyo lanzamiento está previsto para los años 2020. La misión *Europa Clipper* orbitará Júpiter usando asistencias gravitacionales desde sus grandes satélites para maniobrar la nave espacial en repetidos encuentros cercanos con Europa. Esto es similar a la forma en que los diseñadores de *Cassini* usaron la gravedad del Titán para dar forma continuamente a la trayectoria de la nave.

Además, muchos ingenieros y científicos de *Cassini* trabajan en la preparación de esta misión desarrollando versiones extremadamente sensibles y de próxima generación de los instrumentos científicos para el vuelo de *Europa Clipper*.

Retorno a Saturno

En las décadas siguientes, los científicos esperan volver al sistema de Saturno para dar seguimiento a los muchos descubrimientos de la misión *Cassini*. Los conceptos de misión bajo consideración incluyen naves espaciales que se mueven en los mares de metano de Titán y vuelan a través de los géiseres de Encélado para recoger y analizar muestras.

Atmósferas de los planetas gigantes

Las sondas atmosféricas a los cuatro planetas exteriores han sido por mucho tiempo una prioridad para la comunidad científica, y continúa el interés en enviar una misión de estas características a Saturno. *Cassini* ha prepa-

rado el terreno para una eventual sonda atmosférica de Saturno, que estudie directamente la atmósfera superior de Saturno durante sus últimas órbitas y su inmersión final.

Más lejos en el sistema solar, los científicos desean explorar Urano y Neptuno. Hasta ahora, cada uno de estos planetas ha sido visitado por una sola nave espacial (*Voyager 2*, en 1986 y 1989, respectivamente). Colectivamente, Urano y Neptuno son referidos como planetas gigantes de hielo, porque contienen grandes cantidades de materiales (como agua, amoníaco y metano) que forman hielos en las frías profundidades del sistema solar exterior. Esto los hace fundamentalmente diferentes de los planetas gigantes de gas, Júpiter y Saturno, que son casi todo hidrógeno y helio, y los planetas rocosos internos como la Tierra o Marte. No está claro exactamente cómo y dónde se formaron los gigantes del hielo, por qué sus campos magnéticos están extrañamente orientados, y qué impulsa la actividad geológica en algunas de sus lunas. Estos misterios los hacen científicamente importantes, y esta importancia se ve acentuada por el descubrimiento de que muchos planetas alrededor de otras estrellas parecen ser similares a nuestros propios gigantes de hielo.

Varias posibles misiones son discutidas en el documento *Vision and Voyages for Planetary Science in the Decade 2013-2022*, incluyendo orbitadores, vuelos aéreos y sondas que se sumergirían en la atmósfera de Urano para estudiar su composición. Las futuras misiones a los gigantes del hielo podrían explorar esos mundos utilizando un enfoque similar a la misión de *Cassini*.

REFERENCIAS

Agencia Espacial Europea (ESA):

<http://sci.esa.int/Cassini-Huygens/55221-Huygens-titan-science-highlights>

Agencia Espacial Italiana (ASI):

<http://www.asi.it/en/activity/solar-system-exploration/Cassini-Huygens>

Agencia Espacial Norteamericana (NASA)

<https://saturn.jpl.nasa.gov>

<https://saturn.jpl.nasa.gov/mission/top-tens/images>

<https://saturn.jpl.nasa.gov/the-journey/the-spacecraft>

<https://saturn.jpl.nasa.gov/the-journey/timeline/#exploring-jupiter>

<https://www.nasa.gov/europa>

https://www.nasa.gov/pdf/59403main_model_challenging.pdf (instrucciones para construir una maqueta en papel de la Cassini)

<https://photojournal.jpl.nasa.gov/targetFamily/Saturn?subselect=Target%3AS+Rings%3A>

Anuario del Real Observatorio de Madrid para 2017. Ministerio de Fomento. Instituto Geográfico Nacional.

Porco CC, et al. (2005). Cassini Imaging Science: Initial Results on Saturn's Rings and Small Satellites. *Science* 307, 1226–1236.

Puede descargarse desde la página de Cassini Imaging Team <http://ciclops.org/sci/reports.php>

James Oberg (Enero 2005). How Huygens avoid disaster. *The Space Review*.

Puede verse en <http://www.thespacereview.com/article/306/1>

MacTutor History of Mathematics. Universidad de St. Andrews.

<http://www-history.mcs.st-and.ac.uk>

Madrid Deep Space Communications Complex

<https://www.mdsc.nasa.gov>

Vision and Voyages for Planetary Science in the Decade 2013–2022. National Academy of Sciences. The National Academies Press, Washington, 2011.

Puede descargarse de la página <https://solarsystem.nasa.gov/2013decadal>

Wikipedia

<https://en.wikipedia.org/wiki/Cassini-Huygens>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Huygens_\(spacecraft\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Huygens_(spacecraft))

Ernesto Martínez García

Dpto. de Matemáticas Fundamentales