

SATURNO: MUNDOS REVELADOS

ROMINA P. DI SISTO

SE DOCTORÓ EN ASTRONOMÍA EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA (UNLP). ES DOCENTE DE LA FACULTAD DE CIENCIAS ASTRONÓMICAS Y GEOFÍSICAS DE LA UNLP E INVESTIGADORA DEL CONICET. SUS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN SE CENTRAN EN EL ESTUDIO DE LOS CUERPOS PEQUEÑOS DEL SISTEMA SOLAR, SU DINÁMICA, RELACIÓN ENTRE POBLACIONES Y VÍNCULO CON LOS SATÉLITES PLANETARIOS Y PRODUCCIÓN DE CRÁTERES.

PALABRAS CLAVES:
SATÉLITES DE SATURNO,
MISIÓN CASSINI-
HUYGENS, CIENCIAS
PLANETARIAS

RESUMEN. Saturno es el segundo planeta más grande (en tamaño y masa) de nuestro sistema solar, luego de Júpiter, pero tal vez el que más atención ha atraído tras el descubrimiento de su sistema de anillos, que observó por primera vez Galileo en 1610, aunque revelado más tarde por Christiaan Huygens, en 1659. Es uno de los cuatro planetas gigantes de nuestro sistema solar y orbita al Sol a unas ~10 UA *; es visible a simple vista y, por lo tanto, conocido desde la Antigüedad.

Saturno, sus satélites y anillos, ha sido observado desde la Tierra y visitado por las sondas espaciales Pioneer 11 y Voyager 1 y 2 en 1979, 1980 y 1981, respectivamente, que aumentaron de manera notable lo que se conocía de este sistema. Las imágenes de las Voyager revelaron satélites con superficies muy diversas (Smith *et al.*, 1982) y con historias diferentes.

Más recientemente, el sistema de Saturno ha sido estudiado en profundidad por la misión Cassini-Huygens, que operó entre 2004 y 2017, y realizó numerosos e impresionantes descubrimientos. Las observaciones mostraron una variedad de satélites, estructuras en sus superficies e interacciones con Saturno y los anillos, que plantean el estudio de nuevos procesos físicos, geológicos, dinámicos, químicos e incluso biológicos en terrenos y “hábitats” completamente nuevos. Cada satélite es un mundo único que presenta nuevos retos y paradigmas para los estudios planetarios en general. En este artículo presentaremos los descubrimientos más recientes en el sistema de Saturno, así como los escenarios y planteos para un abordaje interdisciplinario que permite la interrestricción de los fenómenos físicos observados.

KEYWORDS:
SATURN'S SATELLITES,
CASSINI-HUYGENS
MISSION, PLANETARY
SCIENCES

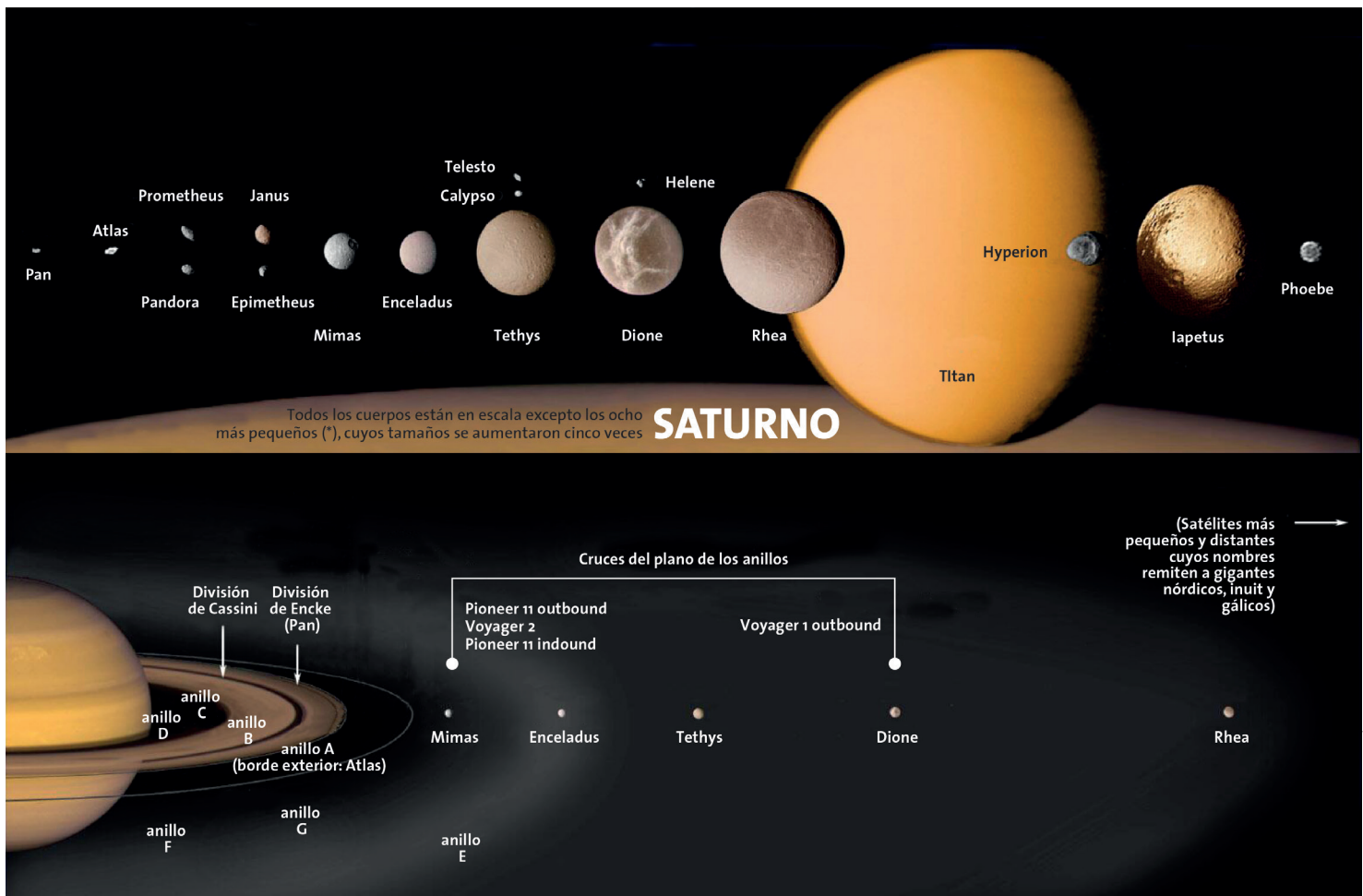
ABSTRACT. Saturn is the second largest planet in our Solar System after Jupiter, but perhaps the one that has attracted the most attention after the discovery of its ring system, first observed by Galileo in 1610 and later revealed by Christian Huygens in 1659. It orbits the Sun at ~ 10 AU and because it is visible to the naked eye it has been known since ancient times. Saturn, its satellites and rings, has been observed from Earth and visited by Pioneer 11 and Voyager 1 and 2 spacecraft in 1979, 1980 and 1981 respectively, which greatly increased what was known of this system.

Voyager images revealed satellites with very diverse surfaces and different histories. More recently, the Saturn System has been studied in depth by the Cassini-Huygens mission, which was conducted between 2004 and 2017 and made numerous and impressive discoveries.

Observations have shown a variety of satellites, several features on their surfaces, and interactions with Saturn and the rings, suggesting the study of new physical, geological, dynamic, chemical, and even biological processes in entirely new terrain and “habitats”. Each satellite is a unique world that presents new challenges and paradigms for planetary studies in general. In this article we will present the most recent discoveries in the Saturn system and how they constitute scenarios and approaches for interdisciplinary work that allows the interrestriction of the observed physical phenomena.

SATURNO Y SU SISTEMA DE SATÉLITES Y ANILLOS

Saturno es un planeta gigante gaseoso, con un diámetro ecuatorial de 120 536 km y una masa igual a 0,00028 veces la masa del Sol. Debido a su rotación rápida es levemente achatado y tiene una densidad menor que la del agua. Se piensa que en su interior hay un núcleo sólido de material congelado y tiene una extensa atmósfera de hidrógeno y helio. Los planetas gigantes poseen un amplio sistema de satélites, algunos de los cuales tienen características físicas y dinámicas regulares, son aproximadamente esféricos o elipsoidales y se encuentran cerca de su planeta madre en órbitas cuasicirculares. Otros satélites poseen formas y órbitas irregulares, con grandes semiejes, inclinaciones y excentricidades orbitales. Estos últimos, llamados satélites irregulares, fueron planetesimales que se formaron alrededor del Sol para luego ser fracturados por colisiones y capturados por los planetas gigantes al final del proceso de formación planetaria. Está generalmente aceptado que los satélites regulares se formaron *in situ*, probablemente a partir de un disco de acreción en el plano ecuatorial del planeta. En Saturno, se conocen 62 satélites¹ que presentan una gran diversidad de superficies y tamaños, como puede apreciarse en la Figura 1; algunos de ellos son muy pequeños y asociados al sistema de anillos, luego tenemos los satélites regulares de tamaño mediano, y el satélite más grande, Titán, y un amplio conjunto de satélites irregulares. Los satélites de Saturno son mundos en los que coexisten diferentes procesos endógenos (geofísicos y geológicos) con procesos exógenos como craterización, interacción con partículas cargadas de Saturno, polvo, etc. (por ejemplo, véase Coradini *et al.*, 2009). Existe una diversidad de fenómenos para estudiar y contrastar con las observaciones, especialmente de la sonda Cassini-Huygens.



1 https://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_discovery

LOS SATÉLITES PEQUEÑOS Y EL SISTEMA DE ANILLOS

El sistema de anillos y los satélites pequeños inmersos en ellos son los más cercanos al planeta y juntos constituyen un sistema dinámico donde tiene lugar una variedad de procesos físicos que compiten entre sí (Porco *et al.*, 2007). Los mecanismos de formación y destrucción son evidentes en todo el escenario de satélites más anillos. Los anillos de Saturno se extienden en el plano ecuatorial del planeta a una distancia de la superficie de entre 6630 a 120 700 km. Están formados por partículas de hielo, principalmente de agua, del tamaño de micrones hasta algunos metros de diámetro. El origen, la edad y la evolución dinámica de los anillos de Saturno es aún materia de debate. Se ha propuesto que se formaron por la destrucción por mareas de un objeto del tamaño de Titán que migró hacia el planeta por la interacción con el gas circunplanetario (Canup, 2010). Este objeto se desintegró al pasar el límite de Roche (distancia a la cual la fuerza de marea de Saturno sobre diferentes partes del objeto lleva a su fragmentación) y formó un disco de pequeñas partículas.

Sin embargo, hay teorías que sugieren que los anillos se pueden haber formado más recientemente. La dinámica de los anillos es muy compleja, lo cual determina una estructura bien definida con zonas de mayor y menor densidad de material y con divisiones entre estas regiones. Los anillos principales son los llamados anillos A y B, separados entre sí por lo que se conoce como la división de Cassini. Luego se distinguen hacia Saturno los anillos C y D, más tenues pero extensos. Hacia fuera del anillo A tenemos un anillo delgado y débil denominado anillo F, y luego el anillo G; en la región de los satélites medianos se extiende el anillo E, que alcanza su mayor densidad a la distancia de Enceladus. Si bien la dinámica de los anillos se estudió ampliamente, la misión Cassini permitió observar detalles en su estructura que solo estaban predichos teóricamente. Por ejemplo, se pudo observar y descubrir pequeños satélites dentro de los “vacíos” (*gaps*), justamente provocados por ellos, como el pequeño satélite Daphnis, cuya perturbación sobre el borde del anillo A provoca ondas de densidad horizontales y verticales (Figura 2).

Los satélites pequeños relacionados con el sistema de anillos están o bien inmersos en ellos, produciendo una brecha, o simplemente orbitando en el borde de un anillo. Presentan una amplia variedad de formas y tienen radios de entre 300 m y 135 km. Tienen altas porosidades y densidades muy bajas: aproximadamente la mitad de la densidad de agua.

Los satélites asociados al anillo A son el satélite Pan, de radio $R=14$ km, dentro del *gap* de Encke; Daphnis ($R=3,8$ km), dentro del *gap* de Keeler y Atlas ($R=15,1$ km), que orbita justo afuera del anillo A. Las observaciones de Pan y Atlas muestran que estos objetos tienen una cresta ecuatorial muy llamativa (Charnoz *et al.*, 2007; Porco *et al.*, 2007), cuyo origen no es claro (Figura 3). Según Porco *et al.* (2007), una posible explicación es que los tres satélites probablemente crecieron a partir de núcleos que eran de un tercio a la mitad de sus tamaños actuales por acumulación de material del anillo A durante una etapa de formación inicial. Una vez que llenaron su lóbulo de Roche, se formó una etapa secundaria de acreción que se dio a lo largo del ecuador, lo cual les dio esta apariencia de “plato volador”.

Prometheus ($R=43,1$ km) y Pandora ($R=40,6$ km) orbitan dentro y fuera del anillo F, respectivamente. Tienen formas alargadas y una superficie muy craterizada, aunque hay evidencia de depósitos de material en los cráteres. Pandora tiene notables ranuras de hasta 30 km de largo y 1 km de ancho que probablemente sean debidas a las mareas (Morrison *et al.*, 2009). Janus ($R=89,2$ km) y Epimetheus ($R=58,2$ km) exhiben una relación dinámica que es única en nuestro sistema solar: intercambian órbitas cada 4 años debido a su libración en órbitas de herradura (ver, por ej., Dermott y Murray, 1981), y siempre sus semiejes mayores difieren por ~ 48 km (El Moutamid *et al.*, 2016). Sus superficies están llenas de cráteres cubiertos por material suelto (Thomas *et al.*, 2013). Epimetheus tiene surcos de 5-20 km de longitud, de diferentes anchos, en la región del polo sur (Morrison *et al.*, 2009). El patrón de ranuras es consistente con tensiones debidas a efectos de las mareas.

Figura 2. Ondas de densidad provocadas por el satélite Daphnis sobre el anillo A (Imagen obtenida de NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute).

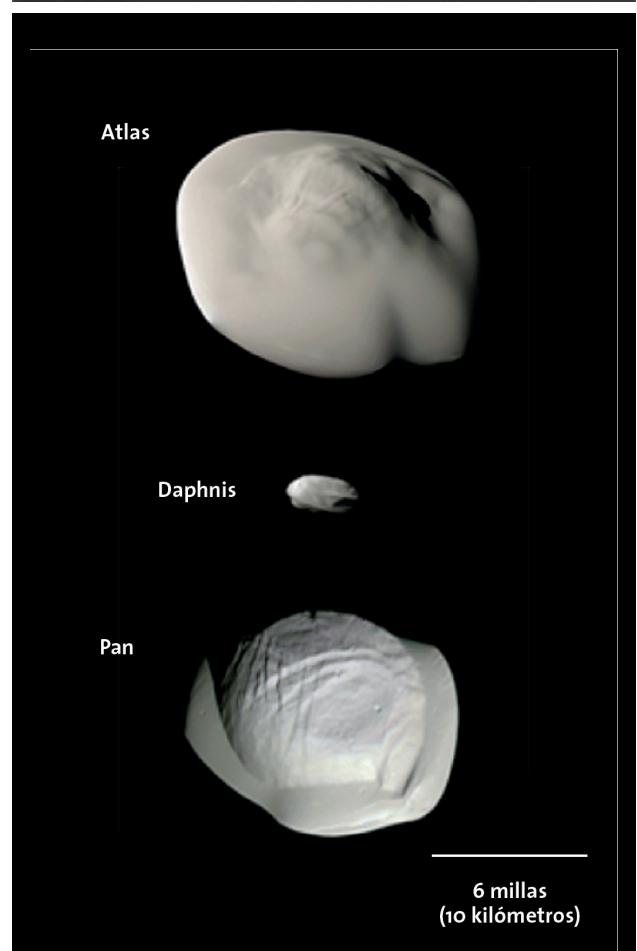
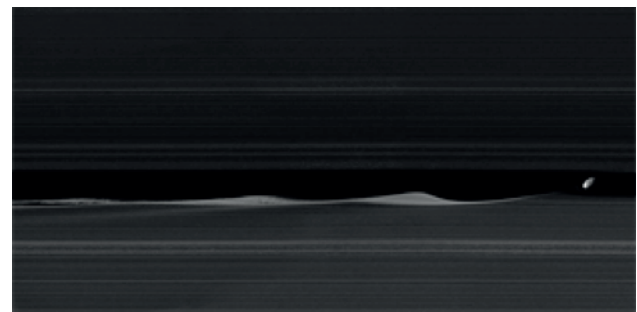


Figura 3. Satélites asociados al anillo A (Imagen obtenida de NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute).



Figura 4. Hyperion
(Imagen obtenida de NASA, ESA, JPL, SSI and Cassini Imaging Team).

Entre las órbitas de Janus/Epimetheus y Encelado, cuatro muy pequeños satélites yacen incrustados en anillos o arcos de escombros. Aegaeon ($R=330$ m), Methone ($R=1,45$ km) y Anthe ($R=500$ m) y Pallene ($R=2,23$ km). Fueron descubiertos recientemente por el equipo de Cassini y todavía no hay consenso sobre su origen.

Otro grupo distintivo de entre los satélites pequeños son los satélites troyanos. Telesto ($R=12,4$ km) y Calypso ($R=9,6$ km) libran alrededor de los puntos lagrangianos de Tethys y Helene ($R=18$ km) y Polydeuces ($R=1,3$ km) de Dione. Se cree que estos satélites troyanos se formaron a través del proceso de acumulación masiva en una etapa intermedia de Saturno. Tanto Telesto como Calypso, así como Helene, tienen cráteres grandes pero cubiertos de escombros que llenan parcialmente los cráteres (Thomas *et al.*, 2013). Cassini ha obtenido imágenes con gran resolución de Helene que muestran que tiene una superficie bimodal con una densidad de cráteres del lado “leading” mucho menor que el lado “trailing”. Esto se debe a que el polvo y partículas del anillo E se deposita sobre el lado leading y borra los cráteres, sobre todo, los más pequeños.

El satélite más grande del grupo de satélites pequeños y el más distante es Hyperion ($R=135$ km). Es uno de los objetos más interesantes y llamativos del sistema solar. Tiene una forma irregular (Figura 4) y un grado inusualmente alto de porosidad (> 40 %) (Thomas *et al.*, 2007), estimado a partir de su tamaño y densidad, y corroborado por la aparición de cráteres conservados, de 2 a 10 km de diámetro. Tiene una rotación caótica, que fue descubierta por las Voyager (Wisdom *et al.*, 1984; Binzel *et al.*, 1986) y confirmada por Cassini. Su forma irregular, al igual que la rotación caótica, probablemente implican que Hyperion es un remanente de un cuerpo más grande que fue destruido por un gran impacto en el pasado (Smith *et al.*, 1982).

LOS SATÉLITES MEDIANOS

Los satélites medianos de Saturno son Mimas, Enceladus, Tethys, Dione, Rhea y Iapetus. Son satélites regulares, principalmente compuestos por hielo de agua, con densidades de entre $0,99$ y $1,6$ g/cm^3 y están en rotación sincrónica. La misión Cassini los observó a todos en detalle, lo que permitió obtener información precisa sobre las formas, radios medios, densidades (Thomas, 2010) y campos de gravedad (Jacobson *et al.*, 2006). Las imágenes de alta resolución de Cassini posibilitaron obtener la distribución y número de cráteres de impacto según su tamaño (Kirchoff y Schenk, 2009 y 2010). Además, algunos de estos satélites muestran rastros de actividad y renovación de su superficie, posiblemente debido a procesos geológicos recientes. La actividad geológica podría incluir actividad endógena, tal como relajación viscosa, volcanismo o actividad tectónica, o incluso procesos atmosféricos. También hay evidencia de procesos exógenos que modifican las superficies, como la caída de partículas del anillo E (en el cual están inmersos la mayoría de los satélites medianos).

Mimas ($R=198,2$ km) es el más pequeño e interior de los satélites medianos. Su superficie está compuesta por hielo de agua, es altamente craterizado y tiene un gran cráter de impacto, de 130 km de diámetro, conocido como Herschel.

El siguiente satélite en distancia a Saturno es Enceladus ($R=252,1$ km). La sonda Cassini realizó tres sobrevuelos cercanos a él entre febrero y julio de 2005; el más cercano, a 168 km de la superficie. Las observaciones revelaron lo que quizás fue el mayor descubrimiento de esta sonda: géiseres de vapor de agua (Figura 5), que salen del satélite a través de ranuras en el polo sur llamadas “rayas de tigre” (Figura 6). Este espectacular fenómeno implica la posible existencia de un océano de agua líquida (Figura 7) que se encuentra debajo de la superficie cubierta de hielo (Porco *et al.*, 2006).

Enceladus está cubierto de hielo de agua casi por completo, excepto cerca de su polo sur donde se encontraron rastros de hielo de CO_2 y orgánicos simples (Brown *et al.*, 2006). En el polo sur se halló una zona que es 20 K más caliente de lo esperado (Spencer *et al.*, 2006), lo que parece estar asociado a las grietas de rayas de tigre.

Newman *et al.* (2008) analizaron la distribución de hielo cristalino y amorfo y demostraron que en la superficie de Enceladus el hielo es mayormente cristalino, pero en las grietas de rayas de tigre se encontró hielo amorfo, lo cual implica actividad geológica criovolcánica en esta zona, que coincide con las eyecciones de vapor de agua observadas.

Las eyecciones de vapor de agua y micropartículas que emanan del polo sur, vuelven a caer en cierta medida a la superficie, lo que hace que toda la superficie de Enceladus esté en constante cambio y sea muy joven.

Tethys (R= 531 km) viene luego de Enceladus. Está cubierto de cráteres, entre los que se destacan el gran cráter de impacto, conocido como Odysseus (400 km de diámetro) y una fractura muy grande, llamada Ithaca Chasma, cuya extensión es de unos 2000 km. Emery *et al.* (2005) realizaron mediciones espectrales y encontraron que su composición es enteramente de hielo agua (H₂O). Tiene llanuras más craterizadas y zonas más jóvenes, como el interior del cráter Odysseus. Luego de los descubrimientos en Enceladus se buscaron posibles géiseres, pero no se detectaron.

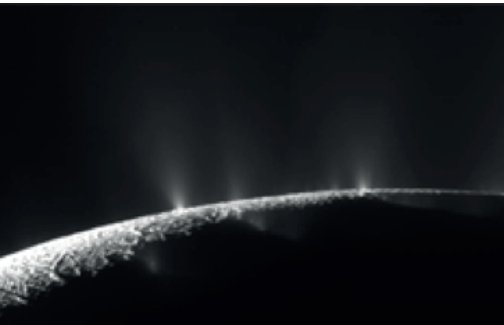


Figura 5. Géiseres de vapor de agua en Enceladus (Imagen obtenida de NASA/JPL/SSI; Mosaic: Emily Lakdawalla).

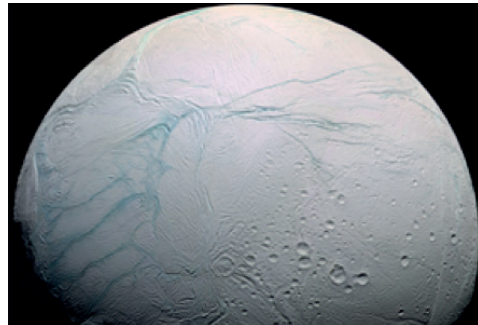


Figura 6. Rayas de tigre recientes en el satélite Enceladus (Imagen obtenida de NASA, ESA, JPL, SSI, Cassini Imaging Team).

Dione (R=561,4 km) fue sobrevolada por Cassini varias veces; el sobrevuelo más cercano se realizó a solo 99 km de la superficie. Clark *et al.* (2008) encontraron que la superficie de Dione está compuesta principalmente de hielo de agua, pero también posee un componente oscuro similar a lo encontrado en Iapetus, Phoebe y en el anillo F. Aunque no se han observado regiones activas geológicamente, las imágenes de alta resolución muestran hielo de agua limpia, lo que implica que podría haber habido procesos tectónicos recientemente.

Rhea (R=764,5 km) fue estudiada en detalle por Cassini en numerosos sobrevuelos. Su superficie tiene un albedo alto, lo que sugiere una composición de hielo de agua. Las determinaciones de la densidad y el momento de inercia axial indican que Rhea es un cuerpo no diferenciado, compuesto casi homogéneamente por un 75 % de agua helada y un 25 % de roca (Anderson y Schubert, 2007). También se observaron cráteres grandes y cuencas de hasta 500 km de diámetro, pero altamente degradadas. Sin embargo, no se hallaron evidencias de erosión por criovolcanismo: además, si Rhea tiene un interior homogéneo, el criovolcanismo es improbable. El proceso principal que afecta a las propiedades superficiales de Rhea sería la interacción entre el material de la superficie y los impactos de partículas energéticas de la magnetosfera de Saturno. Este proceso podría ser responsable de la concentración de material oscuro en el hemisferio anterior. Teolis *et al.* (2010) detectaron una tenue atmósfera de oxígeno y dióxido de carbono que parece sostenerse por la descomposición química de la superficie del hielo de agua bajo la irradiación del plasma de la magnetosfera de Saturno.

Iapetus (R= 734,3 km) es otro cuerpo intrigante de nuestro sistema solar. Su característica distintiva es la dicotomía de color y albedo observada en su superficie.

El hemisferio anterior es oscuro, de un color más rojo, y tiene un albedo de ~0,04 (llamado Cassini Regio), mientras que el hemisferio posterior y los polos son brillantes, con un albedo de ~0,6 (Figura 8). Otra característica relevante en la superficie de Iapetus es un sistema de crestas de picos alineados que se elevan más de

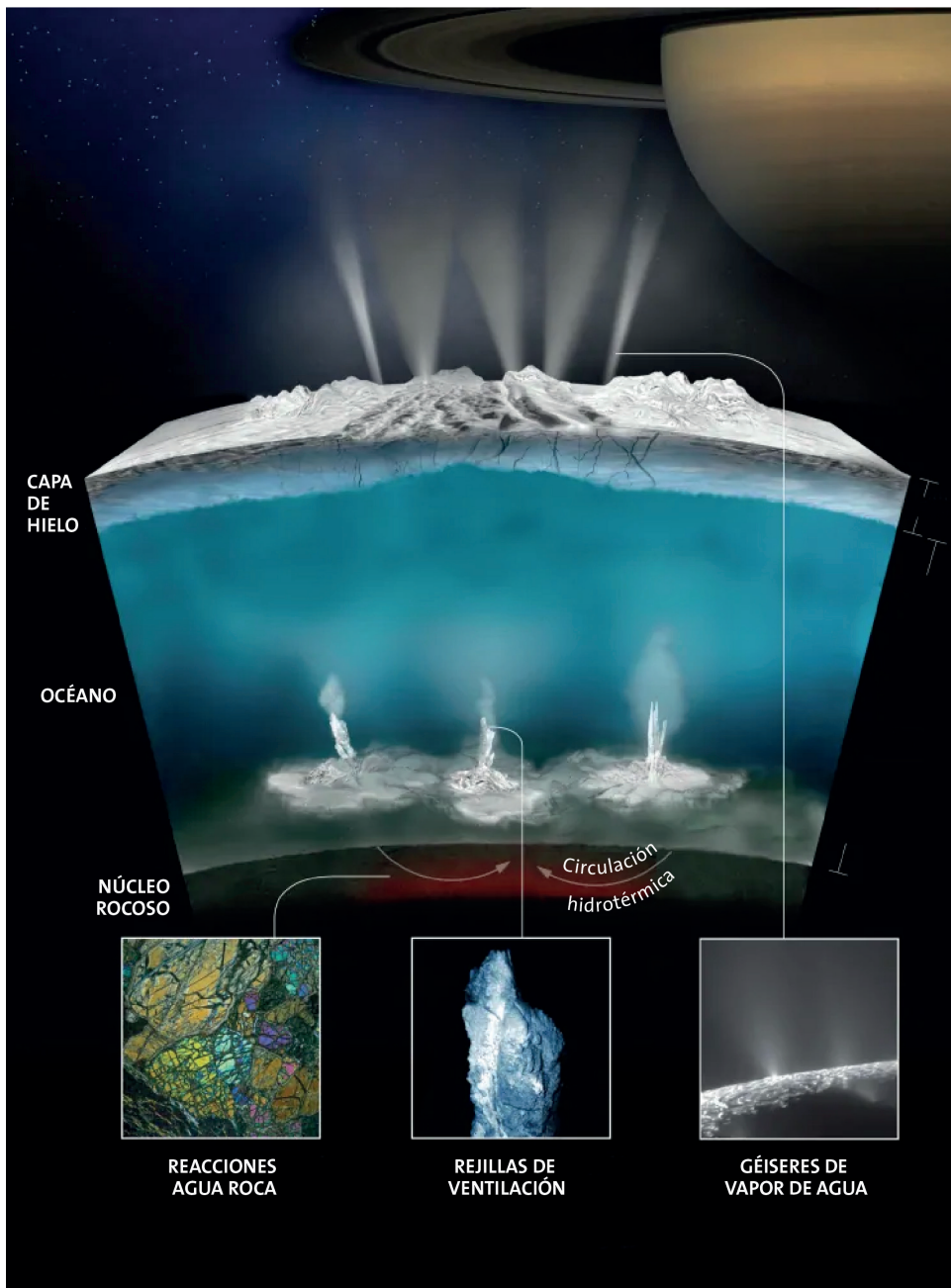


Figura 7. Ilustración sobre el posible océano subterráneo en Enceladus y cómo se produce la actividad criovolcánica (Imagen obtenida de NASA/JPL-Caltech/Southwest Research Institute).

20 km respecto de las planicies circundantes, distribuidos casi en el ecuador del satélite. Esta cresta parece ser una característica antigua, ya que está cortada por cráteres de impacto en algunas partes. Iapetus está repleto de cráteres, lo que implica que su superficie es globalmente antigua (Denk *et al.*, 2010).

TITÁN

Titán es el satélite más grande de Saturno y el segundo satélite de mayor tamaño del sistema solar, luego de Ganymede. Es la única luna de nuestro sistema solar que tiene una atmósfera sustancial. Titán, como Enceladus, alberga entornos químicos complejos de interés astrobiológico. El módulo de aterrizaje Huygens y las observaciones de Cassini revelaron muchas características interesantes sobre el entorno de Titán. Se descubrió una variedad de procesos geofísicos y meteorológicos que incluyen dunas eólicas, redes fluviales, lagos y mares de hidrocarburos, actividad tectónica y nubes convectivas. Todos estos procesos estarían interconectados e influenciados por la topografía local o global.

Titán es el único lugar en el sistema solar, aparte de la Tierra, del que se sabe que tiene un ciclo hidrológico activo pero basado en el metano. Este ciclo produce el intercambio entre reservorios atmosféricos, superficiales y subsuperficiales, es decir, sistemas de nubes de metano y etano, lluvias y tormentas, erosión y depósito en los suelos, y un clima activo en escalas de tiempo estacionales (Figura 9). Se piensa que debajo de la gruesa capa de hielo de agua de Titán hay un océano, principalmente de agua líquida.

El agua subsuperficial de Titán podría ser un lugar para albergar vida como la conocemos, mientras que su superficie de lagos y mares de hidrocarburos líquidos podría albergar vida que utiliza una química diferente a la que estamos acostumbrados.

Cassini realizó varios sobrevuelos para determinar el campo gravitatorio de Titán y las variaciones de marea. El último, realizado en 2015 sobre la región polar norte, permitió ajustar el modelo sobre el campo gravitatorio, lo cual indicaría la existencia de un océano interno de alta densidad (Durante *et al.*, 2019).

Las características de la superficie son variadas, como ya se mencionó, y se estudiaron con diferentes tipos de radares de la sonda Cassini. Además, se realizaron estudios sobre la edad de

cada una de sus unidades geomorfológicas, que son las siguientes (en orden de área de la superficie total): llanuras, dunas, cadenas montañosas y terrenos brillantes, terrenos de laberinto (mesetas diseccionadas), lagos (Figura 10) y cráteres de impacto. Los terrenos más antiguos son las montañas y las mesetas, y las llanuras son más jóvenes. Las dunas y lagos de hidrocarburos líquidos son los terrenos más jóvenes en Titán. También se han identificado características individuales, como bordes de cráteres, canales y candidatos a criovolcanes. Titán es un mundo increíblemente asombroso y con una dinámica geológica muy parecida a la de la Tierra. Cassini recopiló muchos datos e información que está aún en estudio. Un trabajo de revisión sobre todo lo hallado hasta ahora es el de Lopes *et al.* (2019).

CÁLCULO DE CRATERIZACIÓN: MODELO Y OBSERVACIONES

La naturaleza y la forma de todos los cuerpos del sistema solar son el resultado de procesos físicos, químicos y dinámicos ocurridos durante su gestación y subsecuente evolución, y de las complejas interacciones entre ellos. En particular, las colisiones entre los cuerpos de nuestro sistema solar han sido un proceso natural y usual en toda su historia, que han dado lugar a la formación de los planetas y sus satélites, y a la generación de los “restos”, los pequeños cuerpos.

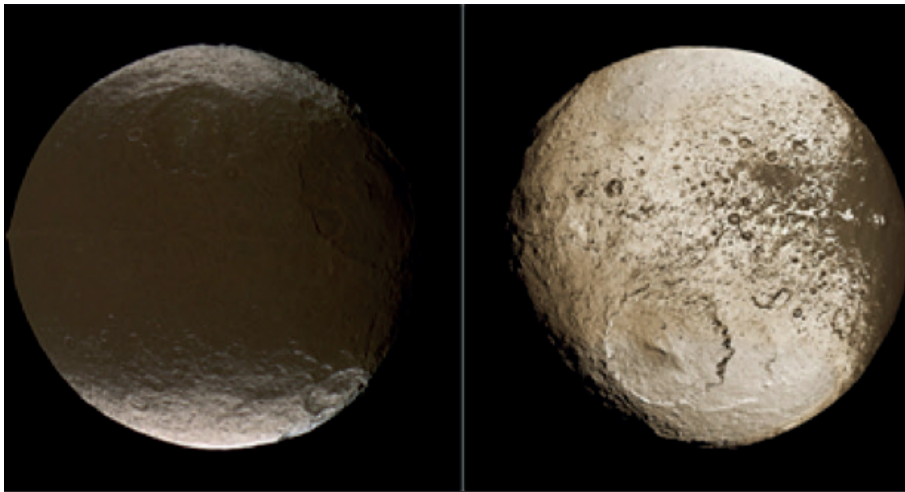
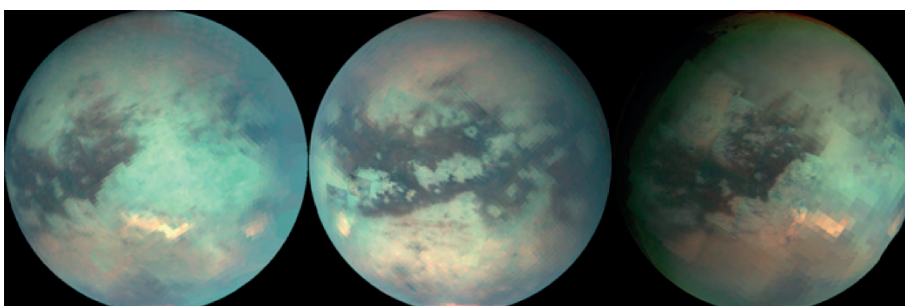


Figura 8. Iapetus y su dicotomía (Imagen obtenida de NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute).

Figura 9. Imágenes en infrarrojo de Titán tomadas por Cassini durante los últimos tres sobrevuelos. Se ven los cambios en su superficie (Imagen obtenida de NASA/JPL/University of Arizona).



Existen evidencias concretas de intensos procesos de impactos en el pasado que quedaron reflejados en los cráteres de impacto en las superficies de los objetos de nuestro sistema solar. Estos constituyen una gran herramienta de estudio de la que es posible obtener información sustancial. Representan una “marca” en la superficie de los cuerpos, que permite, por un lado, obtener información de la superficie del objeto y, por otro, obtener información sobre la población impactora. El estudio conjunto del fenómeno de craterización desde la geología del objeto impactado y desde la dinámica del proceso permite un doble proceso de restricción entre los fenómenos que modifican la superficie del blanco y las propiedades y dinámica de los impactores.

En este sentido, las misiones recientes a los objetos del sistema solar han aportado observaciones y estudios tan detallados que plantean nuevos desafíos para los astrónomos y geólogos. En particular, como ya vimos, la sonda Cassini-Huygens, enviada al sistema de Saturno, mostró una variedad de satélites, estructuras en sus superficies e interacciones con Saturno y los anillos que plantean el estudio de nuevos procesos físicos, geológicos, dinámicos, químicos e incluso biológicos en terrenos y “hábitats” completamente nuevos. Cada satélite es un mundo único que presenta nuevos retos y perspectivas para los estudios planetarios en general.

Nuestro aporte al estudio del sistema de Saturno desde un punto de vista astronómico dinámico lo constituye un conjunto de trabajos sobre la craterización de los satélites (Di Sisto y Brunini, 2011; Di Sisto y Zanardi, 2013, 2016; Rossignoli *et al.*, 2019). En dichos trabajos, presentamos un estudio teórico sobre las colisiones de cuerpos pequeños de nuestro sistema solar sobre los satélites de Saturno y la producción de cráteres asociada.

En el sistema solar actual, los cuerpos heliocéntricos que son proyectiles potenciales para producir cráteres en los satélites de los planetas gigantes son los objetos centauros. Estos se originan en la región transneptuniana, más allá de Neptuno, en particular en lo que se conoce como el “disco dispersado” (SD, siglas en inglés de *scattered disc*). Estos objetos (SDO, siglas de *scattered-disc objects*) con distancias perihélicas (q) entre 30 UA y 39 UA pueden cruzar la órbita de Neptuno y eventualmente evolucionar hacia la región planetaria convirtiéndose en centauros (Di Sisto y Brunini, 2007). En nuestros trabajos desarrollamos un modelo teórico para calcular los cráteres de impacto producidos por los objetos centauros sobre los satélites de Saturno en toda la edad del sistema solar (4500 millones de años).

Comparamos nuestro modelo teórico con las observaciones de las sondas Cassini-Huygens y Voyager, y presentamos conclusiones sobre características tanto de la población de impactores como de la geología y procesos físicos en todo el sistema de Saturno.

El modelo desarrollado se describe en los trabajos mencionados, y en el presente artículo presentaremos brevemente algunas conclusiones y resultados particulares a modo de ejemplo. Las incertezas que involucran el modelo teórico tienen que ver mayormente con la incerteza en la distribución de tamaños de la población impactora. En nuestro sistema solar los cuerpos pequeños tienen tamaños que van desde micrones hasta cientos de kilómetros y hay mayor cantidad de objetos pequeños que grandes. Es decir que la distribución de tamaños sigue una ley de potencias donde el número de objetos $N(D) \sim D^{-q}$, donde q es positivo. La posibilidad de detectar y observar estos objetos con telescopio depende de su tamaño, pero también de su distancia al Sol, ya que brillan al reflejar la luz solar. Cuanto más grande es el objeto, más brillante es, pero cuanto más lejos está, menos brillante es. Estas dos cantidades se conjugan en lo que denominamos la magnitud, y existe una magnitud límite a partir de la cual los telescopios actuales no pueden detectar un objeto. Por lo tanto, dependiendo de la población de cuerpos pequeños (es decir, de su localización), se puede conocer con certeza solo objetos hasta cierto tamaño. Entonces para tamaños “pequeños”, la distribución de tamaños es incierta.

En nuestro trabajo, los impactores son los SDO como ya mencionamos. Su distribución de tamaños se conoce bastante bien para diámetros $d > 60$ km y el exponente de la ley de potencias es $q = 4.7$. Sin embargo, para $d < 60$ km, existe cierta incerteza, ya que la población no se conoce completamente. Lo que sí se sabe es que, en este límite, el índice q cambia a un valor menor y la función distribución de tamaños tiene un “quiebre”. Nosotros asumimos, a partir de los trabajos observacionales al respecto, dos valores límites del índice q ($q = 2.5$ y 3.5) para $d < 60$ km. Por otro lado, las leyes de escala entre el tamaño de un cráter y

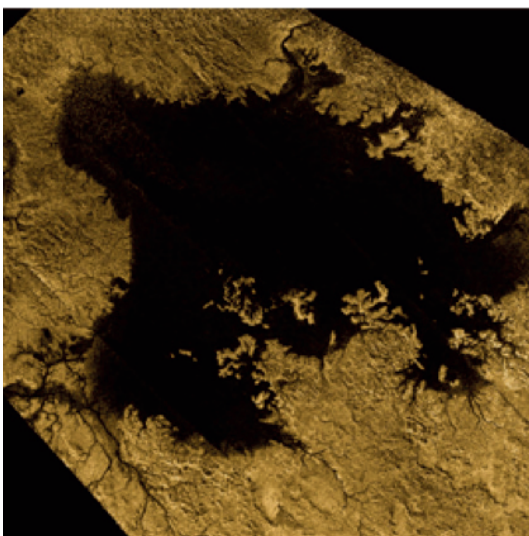


Figura 10. Ligeia Mare en Titán, tomado por Cassini, es uno de los varios lagos y mares de la región polar Norte (Imagen obtenida de NASA/JPL-Caltech/ASI/Cornell).

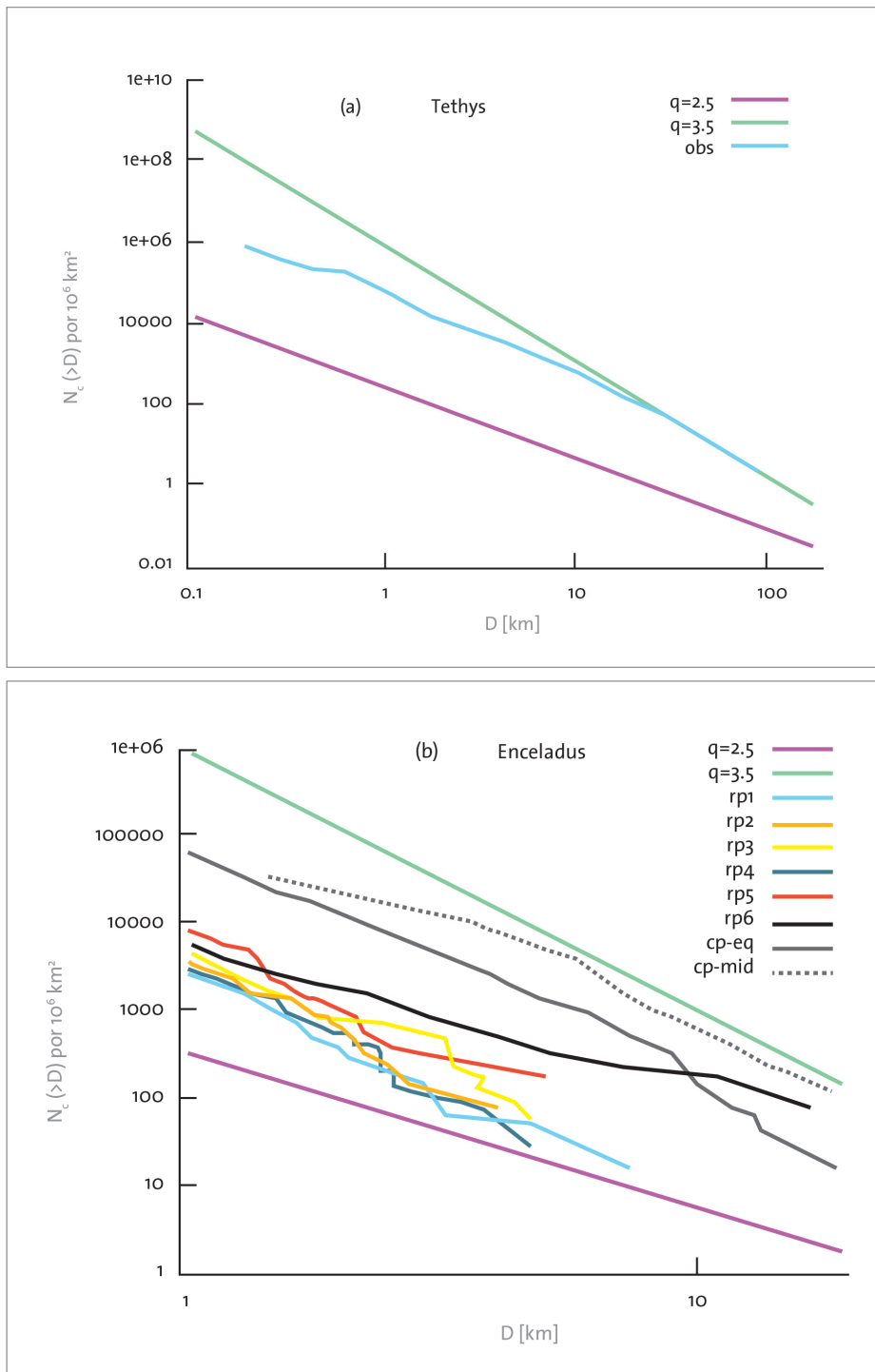


Figura 11. Número acumulado de cráteres calculados a partir de nuestro modelo con los dos valores del índice de la ley de potencia q y número observado de Kirchoff y Schenk (2009) para Tethys (a) y Enceladus (b)

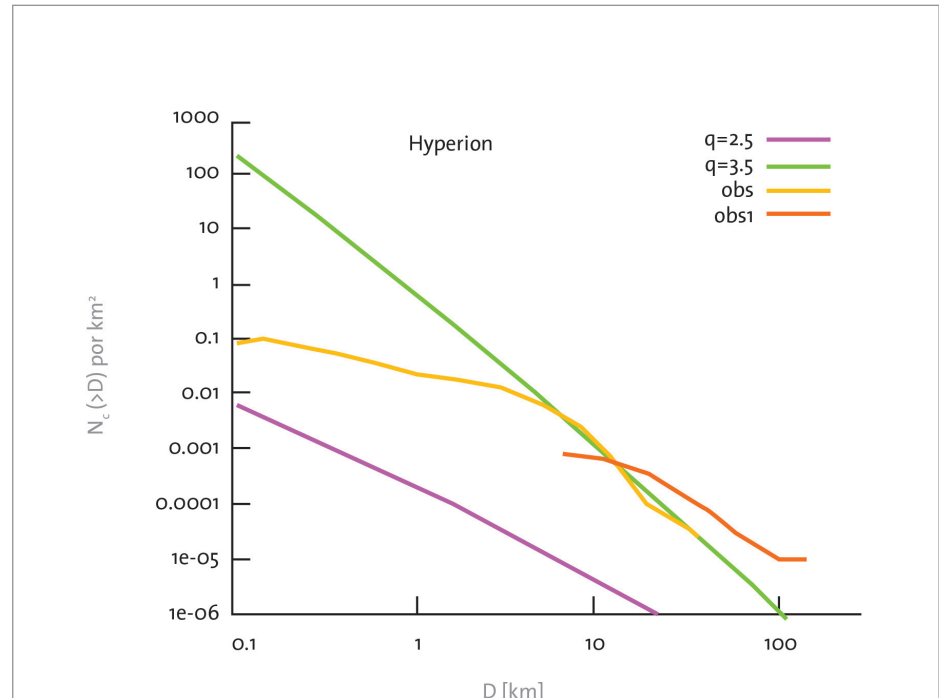
impactora de este sistema son los objetos transneptunianos, mayormente los del SD que nosotros también consideramos para los satélites de Saturno. En la Figura 11 se representan los resultados obtenidos para Tethys y Enceladus. Podemos ver que, en el caso de Tethys (Fig. 11a), la distribución observada coincide con la teórica para $q = 3,5$ para cráteres mayores que ~ 10 km. Para cráteres menores, la observada se hace más plana, como mencionamos antes. No se ha detectado actividad criovolcánica en Tethys pero esta, a un nivel muy bajo, no se puede descartar. Por tanto, el cambio en la pendiente en la distribución de cráteres podría deberse a cierta erosión o al cambio en la población impactora. Enceladus, por su parte, es un mundo geológicamente muy activo y esto puede verse en las diferencias de conteos para los diferentes terrenos identificados en diferente color en la Figura 11b. Esto se debe a que, a medida que nos alejamos de la zona del polo norte, en la cual se ha detectado actividad criovolcánica, la erosión es menor y, por consiguiente, hay más cráteres. Para las zonas denominadas cp-eq y cp-mid, que están lejos de la región de actividad, la distribución de cráteres es más cercana a la teórica y, por tanto, son regiones relativamente antiguas. En cambio, las regiones "rp" están sujetas a los efectos de los "géiseres" que erosionan el terreno borrando los cráteres y volviéndolo más joven.

Para los satélites pequeños obtuvimos resultados similares en cuanto a la comparación entre lo teórico y lo observado, pero, como además son muy pequeños, también pudimos establecer restricciones sobre su origen, formación y edad.

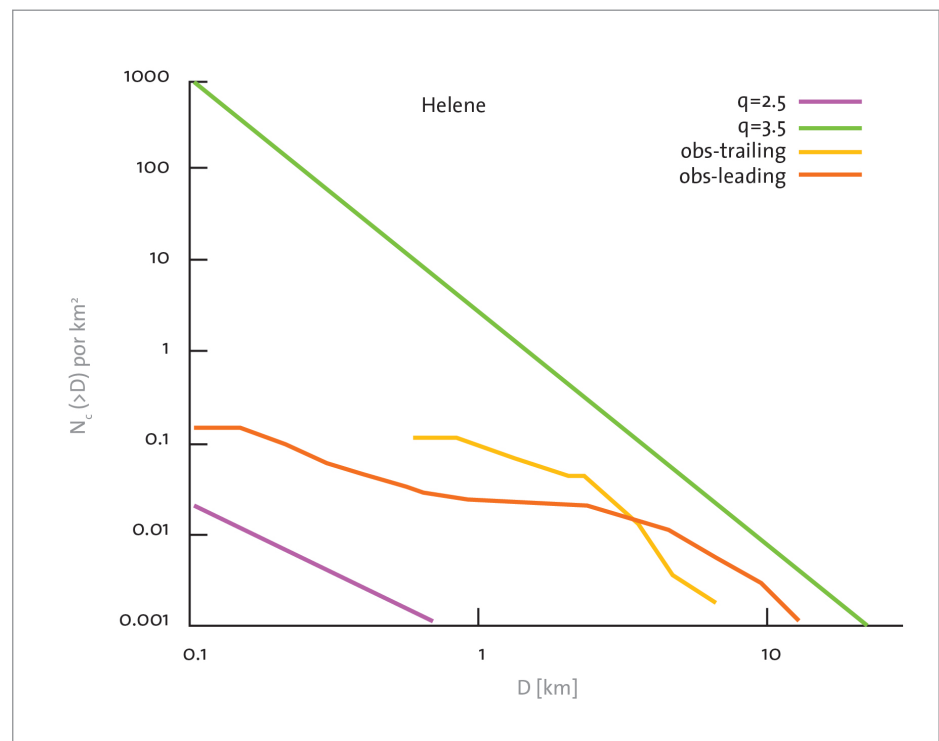
el del impactor se deducen a partir de experimentos de laboratorio en la Tierra. Por tanto, las velocidades y tamaños involucrados no son los que se dan en el espacio. Esto, sumado a la constitución y propiedades de los materiales de los objetos del sistema solar, que no se conocen completamente bien, produce también incertezas en la relación entre el tamaño del cráter y el del impactor. Sin embargo, usando los datos más recientes de las misiones y las leyes más actuales calculamos la distribución de cráteres en los satélites de Saturno, obteniendo los siguientes resultados generales.

Para los satélites medianos, observamos que el índice $q = 3,5$ para la distribución de tamaños de la población impactora produce una distribución de tamaños de cráteres que se ajusta a lo observado. Esto permitió restringir la distribución de tamaños de los objetos del SD para tamaños más pequeños que 60 km de diámetro. Sin embargo, observamos que, en general, para los cráteres más pequeños, el número observado es menor que el calculado. Esta tendencia puede explicarse por al menos dos mecanismos. Por un lado, esto podría ser causado por un proceso de erosión en el satélite que sepulta gradualmente los cráteres, el cual es más efectivo para cráteres más pequeños y podría incluso no afectar a los grandes. Por otro lado, podría haber un nuevo quiebre en la distribución de tamaños de los impactores, de manera que el índice q tome un valor menor. Notamos en general que para tamaños de los impactores $d \sim 0,2-1,4$ km, la distribución de tamaños podría tener un nuevo quiebre, de manera que para $d < 0,2-1,4$ km el índice q podría ser igual a 2,5. Este resultado fue corroborado recientemente por las observaciones de la misión New Horizon a Plutón (Singer *et al.*, 2019). En ese trabajo los autores encuentran que hay, en Plutón y Caronte, un déficit de cráteres menores de 13 km, lo que implica un déficit de impactores menores que $\sim 1-2$ km. La población

Figura 12. Hyperion: número acumulado de cráteres por kilómetro cuadrado como función del diámetro D para nuestro modelo y para las observaciones presentadas en Thomas *et al.* (2007).



Por ejemplo, para Hyperion, en la Figura 12, podemos observar que, para cráteres mayores que ~8 km, la distribución observada y la teórica para $q = 3,5$ son similares, pero para cráteres más pequeños hay menos cráteres observados, al igual que lo observado para los satélites medianos. En el caso de Hyperion hay dos conteos graficados que corresponden a dos zonas con cráteres de diferente tamaño. Otro ejemplo de este grupo es el caso de Helene, que muestra resultados muy diferentes a Hyperion. En la Figura 13 se muestran las distribuciones teóricas sobre Helene, y las observadas, que corresponden a lo obtenido sobre el lado trailing y el leading. Podemos observar que los conteos de cráteres sobre la superficie de Helene caen entre las dos curvas teóricas de nuestro modelo. Esto se debe a que Helene posee una superficie muy joven, ya que está inmersa en el anillo E, cuyas partículas “caen” sobre Helene, borrando los cráteres. Este efecto es más notable sobre el lado leading y, por tanto, la curva observada está por debajo de la del lado trailing para los cráteres más pequeños.



Para algunos de los satélites de este grupo, nuestros resultados sugieren que sufrieron una o más colisiones catastróficas, durante la edad del sistema solar. O sea que se habrían destruido por completo o al menos dejado un fragmento muy pequeño, ellos son Pan, Daphnis, Atlas, Aegaeon, Methone, Anthe, Pallene, Calypso y Polydeuces. Pero, si se destruyeron, entonces, ¿cómo es que se observan?

Nuestra propuesta es que estos satélites se habrían formado a partir de material en órbita alrededor de Saturno, en épocas más recientes, es decir, luego de la última colisión catastrófica calculada por nuestro modelo. Los más jóvenes serían los satélites asociados a arcos con edades de $\sim 10^8$ años.

Todo el sistema de Saturno constituye un escenario único y, a la luz de la reciente misión Cassini-Huygens, ha sido como un gran laboratorio en el que procesos físicos, dinámicos y geológicos han podido ser estudiados. El legado de la misión y sus increíbles descubrimientos constituyen un gran desafío, para astrónomos y científicos planetarios, para poner a prueba lo más importante que puede aportar el conocimiento científico: la comprensión de los fenómenos naturales como un “todo”.

Figura 13. Helene: número acumulado de cráteres por kilómetro cuadrado como función del diámetro D para nuestro modelo y para las observaciones presentadas en Thomas *et al.* (2007).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, J. D. y Schubert, G. (2007). "Saturn's satellite Rhea is a homogeneous mix of rock and ice". *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02202.
- Binzel, R. P., Green, J. R., y Opal, C. B. (1986). "Chaotic rotation of Hyperion?". *Nature*, 320, 511.
- Brown, R. H., Clark, R. N., Buratti, B., et al. (2006). "Composition and physical properties of Enceladus' surface". *Science*, 311, 1425.
- Canup, R. M. (2010). "Origin of Saturn's rings and inner moons by mass removal from a lost Titan-sized satellite". *Nature*, 468, 943.
- Charnoz, S.; Brahic, A., Thomas, P. C. et al. (2007). "The Equatorial Ridges of Pan and Atlas: Terminal Accretionary Ornaments?" *Science*, 318, pp. 1622-1624.
- Clark, R. N., Curchin J. M., Jaumann, R. et al. (2008). "Compositional mapping of Saturn's satellite Dione with Cassini VIMS and implications of dark material in the Saturn system". *Icarus*, 193, 372.
- Coradini, A., Capaccioni, F., Cerroni, P. et al., (2009). "Saturn satellites as seen by Cassini Mission". *Earth, Moon and Planets*, 105, pp. 289-310.
- Dermott, S. F. y Murray C. D. (1981). "The dynamics of tadpole and horseshoe orbits II. The coorbital satellites of Saturn". *Icarus*, 48, pp. 12-22.
- Di Sisto, R. P. y Brunini, A. (2007). "The origin and distribution of the Centaur population". *Icarus* 190, pp. 224-235.
- Di Sisto, R. P. y Brunini, A. (2011). "Origin of craters on Phoebe: comparison with Cassini's data". *A&A*, 534, A 68.
- Di Sisto, R. P. y Zanardi, M. (2013). "The production of craters on the mid-sized Saturnian satellites by Centaur objects". *A&A*, 553, A 79.
- Di Sisto, R. P. y Zanardi, M., (2016). "Surface ages of mid-size saturnian satellites". *Icarus*, 264, pp. 90-101.
- Durante, D., Hemingway, D. J., Racioppa, P., Iess, L., Stevenson, D. J. (2019). "Titan's gravity field and interior structure after Cassini". *Icarus*, 326, pp. 123-132.
- El Moutamid, M., Nicholson, P. D., French, R. G., et al. (2016). "How Janus' orbital swap affects the edge of Saturn's A ring?". *Icarus*, 279, pp. 125-140.
- Emery, J. P., Burr, D. M., Cruikshank, D. P. et al. (2005). "Near-infrared (0.8–4.0 μ m) spectroscopy of Mimas, Enceladus, Tethys, and Rhea". *A&A*, 435, 1, pp. 353-362.
- Jacobson, R. A., Antreasian, P. G., Bordi, J. J. et al. (2006). "The Gravity Field of the Saturnian System from Satellite Observations and Spacecraft Tracking Data". *AJ*, 132, pp. 2520-2526.
- Kirchoff, M. R., Schenk, P. (2009). "Crater modification and geologic activity in Enceladus' heavily cratered plains: Evidence from the impact crater distribution". *Icarus*, 202, pp. 656-668.
- Kirchoff, M. R. y Schenk, P. (2010). "Impact cratering records of the mid-sized, icy saturnian satellites". *Icarus*, 206, pp. 485-497.
- Lopes, R. M. C., Wall, S. D., Elachi, C., Birch, S. P. D., Corlies, P., Coustenis, A., Zhang, Z. (2019). "Titan as Revealed by the Cassini Radar". *Space Science Reviews*, 215(4).
- Morrison, S. J., Thomas, P. C., Tiscareno M. S. et al. (2009). "Grooves on small saturnian satellites and other objects: Characteristics and significance". *Icarus*, 204, pp. 262-270.
- Newman, S. F., Buratti, B. J., Brown, R. H. et al. (2008). "Photometric and spectral analysis of the distribution of crystalline and amorphous ices on Enceladus as seen by Cassini". *Icarus*, 193, pp. 397-406.
- Porco, C. C., Thomas, P. C., Weiss, J. W., Richardson, C. (2007). "Saturn's small inner satellites: Clues to their origins". *Science*, 318, pp. 1602-1607.
- Rossignoli, N. L., Di Sisto, R. P., Zanardi, M. y Dugaro, A. (2019). "Cratering and age of the small Saturnian satellites". *A&A*, 627, A12.
- Singer, K. N., McKinnon, W. B., Gladman, B. et al. (2019). Impact craters on Pluto and Charon indicate a deficit of small Kuiper belt objects. *Science*, 363(6430), pp. 955-959.
- Smith, B. A., Soderblom, L., Batson, R. M. et al. (1982). "A new look at the Saturn system. The Voyager 2 images". *Science*, 215, pp. 504-537.
- Spencer, J. R., Pearl, J. C., Segura, M. et al. (2006). "Cassini encounters Enceladus: background and the discovery of a south polar hot spot". *Science*, 311, 1401.
- Thomas, P. C. (2010). "Sizes, shapes, and derived properties of the saturnian satellites after the Cassini nominal mission". *Icarus*, 208, pp. 395-401.
- Thomas, P. C., Armstrong, J. W., Asmar, S. W. et al. (2007). "Hyperion's sponge-like appearance". *Nature*, 448, pp. 50-53.
- Thomas, P. C., Burns, J. A., Hedman, M. et al. (2013). "The inner small satellites of Saturn: A variety of worlds". *Icarus*, 226, pp. 999-1019.
- Teolis, B. D., Jones, G. H., Miles, P. F. et al. (2010). "Cassini Finds an Oxygen-Carbon Dioxide Atmosphere at Saturn's Icy Moon Rhea". *Science*, 330, 1813.
- Wisdom, J., Peale, S., Mignard, J. F. (1984). "The chaotic rotation of Hyperion". *Icarus*, 58, 2, pp. 137-152.