

# LA ACTIVIDAD CRIOMAGMATICA ACTUAL EN EL SISTEMA SOLAR EXTERIOR.

OLGA PRIETO BALLESTEROS.

*Centro de Astrobiología-INTA. Ctra. Ajalvir Km. 4, 28850 Torrejón de Ardoz. Madrid.*

## RESUMEN

El estudio de las superficies de los satélites de hielo de los planetas gigantes del Sistema Solar ha permitido reconocer estructuras parecidas a las formadas en la Tierra mediante procesos magmáticos. Dichos procesos actúan sobre los hielos que forman las cortezas de estos cuerpos planetarios, lo que da lugar a nuevos tipos de magmatismo en materiales exóticos. La temperatura necesaria para fundir los hielos es baja, pero aún así, resulta un reto explicar como ocurren estos fenómenos, sobre todo cuando queda por resolver el balance de energía en algunos cuerpos tan pequeños y poco densos como Encelado.

**PALABRAS CLAVE:** Criomagmatismo, hielo, clatrato, satélite de hielo

## INTRODUCCIÓN

Clásicamente, el magmatismo se define como el conjunto de procesos que generan magmas a partir de la fusión de rocas y que promueven su emplazamiento hacia la superficie. Desde un punto de vista físico más general, el magmatismo es un proceso mediante el cual un cuerpo planetario libera la energía que posee. En nuestro planeta, así como en otros cuerpos del Sistema Solar interior, como Marte o Venus, la energía tiene un origen interno y suele provenir de la desintegración de elementos radioactivos acumulados en los minerales silicatados. En superficie, esta actividad se manifiesta bien como volcanes que expulsan lavas o como intrusiones de magmas que han ido solidificados en profundidad y que posteriormente han sido exhumados.

En los planetas del Sistema Solar Exterior no puede haber magmatismo ya que son gigantes de gas, a excepción del lejano Plutón. Sin embargo, los satélites de estos planetas si que tienen cortezas sólidas susceptibles de fundirse si ocurre algún evento térmico. Entre estos satélites y los planetas del Sistema Solar interior existen grandes diferencias tanto en su composición como en el origen de la energía que produce la actividad magmática. Mientras que en el Sistema Solar interior los fundidos generados son de composición principalmente silicatada, los satélites del Sistema Solar exterior están formados por hielos de diferente composición química, como agua, amoníaco, metano, o dióxido de carbono. Los puntos de fusión y de sublimación de estos sólidos son muy bajos, y los procesos magmáticos se generan a temperaturas por debajo de cero grados centígrados, de ahí el nombre de CRIOMAGMATISMO. La proporción de minerales silicatados en estos cuerpos es muy escasa, y como consecuencia, la fuente radiogénica de

energía es normalmente despreciable. No obstante, estos cuerpos se ven sometidos a tensiones producidas por la atracción gravitatoria de los planetas alrededor de los cuales giran, lo que les dota de una gran cantidad de energía alternativa y eficaz para llevar a cabo la diferenciación estructural y renovar su superficie bien mediante tectónica o por criomagmatismo.

La exploración del Sistema Solar exterior nos ha ido revelando la gran actividad geológica que puede ocurrir a temperaturas criogénicas, más allá de Marte. Dicha exploración cuenta únicamente con cuatro misiones espaciales: los Pioneer 10 y 11 lanzados a principios de los años setenta, los Voyager 1 y 2 que desarrollaron su labor sobre todo durante los ochenta, la sonda Galileo lanzada en 1989 y la Cassini-Huygens enviada en 1997. Las sondas Pioneer y la Galileo se lanzaron para investigar el sistema de Júpiter. Los Voyager se concibieron para el reconocimiento de todos los sistemas planetarios hasta los confines más externos del Sistema Solar. Y la Cassini-Huygens se dedica actualmente al estudio del sistema de Saturno, con especial hincapié en analizar el satélite Titán debido al interés astrobiológico que despierta.

Los satélites de hielo varían en cuanto a sus propiedades físico-químicas desde el sistema de Júpiter hasta el de Neptuno (tabla 1). Los satélites de Júpiter son relativamente grandes, incluso comparables al planeta Mercurio, como es el caso de Ganímedes y Calixto. Algunos investigadores han indicado la posibilidad de un gradiente de diferenciación desde Io hasta Calixto, debido a la cantidad decreciente de energía mareal según la distancia a Júpiter. Europa ocupa una posición especial ya que no está tan sometido a las excesivas tensiones de Júpiter como Io, pero acumula energía suficiente como para haber sufrido una actividad geológica intensa. La mayoría de los satélites de Saturno son pequeños y de baja densidad, a excepción

PLANETA	Satélite	Radio (km)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Gravedad sup. (cm/s <sup>2</sup> )	Albedo
Júpiter	Europa	1569	3.01	132	0.64
	Ganímedes	2631	1.93	142	0.43
	Calixto	2400	1.83	123	0.19
Saturno	Mimas	196	1.19	7	0.75
	Encelado	254	1.30	9	1.0
	Tetis	530	1.20	18	0.8
	Dione	560	1.43	22	0.55
	Rhea	765	1.33	28	0.65
	Titán	2575	1.88	135	0.2
	Japeto	730	1.16	24	0.5/0.02
Urano	Miranda	242	1.50	10	0.22
	Ariel	580	1.56	26	0.38
	Umbriel	596	1.78	30	0.16
	Titania	805	1.58	36	0.23
	Oberón	773	1.59	34	0.2
Neptuno	Tritón	1350	2.07	77	0.73

Tabla 1: *Propiedades físicas de los satélites de hielo más importantes del Sistema Solar exterior.*

de Titán. La mayoría tienen superficies antiguas, lo que indica que están energéticamente exiguos. No es el caso de Encelado, del que más adelante se hablará en detalle. El sistema inclinado de Urano tiene satélites con densidades muy parecidas entre sí, y superficies con reflectividad baja. Los datos de las misiones espaciales acaban en el sistema de Neptuno, cuyo satélite, Tritón, es de gran tamaño y densidad anormalmente alta. Estas características, junto con la de su órbita retrógrada inducen a pensar que fue un cuerpo formado en la nebulosa solar y después fue capturado por el planeta.

**LA COMPOSICIÓN DE LOS CRIOMAGMAS.**

La condensación de los hielos se alcanzó en el Sistema Solar exterior debido a las condiciones termodinámicas reinantes durante la formación de los cuerpos planetarios (Lewis 1971, 1972). El agua es la sustancia más común en el Sistema Solar después del H<sub>2</sub> y el He según se establece a partir de diversas fuentes de datos como: 1) la abundancia solar de los elementos (Anders y Grevese 1989), 2) la composición de los cometas y de las condritas carbonáceas y 3) la composición de los satélites del Sistema Solar exterior.

La variación de la composición de los hielos que se han detectado en las superficies de los satélites se ha relacionado con el gradiente de temperaturas existente desde las zonas más cercanas a las más lejanas al Sol (Kargel 1995). El agua forma el hielo de mayor temperatura de fusión, y predomina en el sistema de Júpiter mezclado con sales. La presencia de sales en el sistema acuoso facilita la fusión de los criomagmas pues disminuye la temperatura a la que ocurre el cambio de fase entre 5 y 50 grados, según la composición concreta de la sal. En los satélites de Saturno, el sistema químico también es acuoso pero en vez de sales hay mezclas con sustancias más volátiles. A partir de los modelos geoquímicos teóricos se ha sugerido que el amoníaco y sus hidratos podían ser parte importante de la química de los satélites de Saturno (Lewis 1971, Kargel 1995), pero hasta el momento este hielo no se ha detectado en proporci-

nes apreciables (Waite et al. 2006). La aparente ausencia de este componente plantea problemas para explicar el criomagmatismo en estos cuerpos ya que el amoníaco es muy eficiente haciendo descender la temperatura de fusión hasta 173 K en el eutéctico del sistema. Poco se sabe sobre la composición de los satélites de Urano y Neptuno, pero según nos alejamos del Sol van apareciendo hielos de temperaturas tan extremas como las que forman el metano y el nitrógeno.

Los criomagmas acuosos tienen propiedades diferentes en función del sistema químico que predomine. La densidad y la viscosidad de los magmas, por ejemplo, serán parámetros que limitarán la evolución del criomagmatismo y las estructuras que se deriven y puedan reconocerse en las superficies de los satélites de hielo (Croft et al. 1988, Kargel, 1991). Se han llevado a cabo experimentos en referencia a estas propiedades en las condiciones ambientales de los satélites de hielo, pero aun queda mucho por hacer. Un problema que siempre se plantea durante el estudio del emplazamiento de los magmas acuosos es la flotabilidad negativa que estos tienen sobre el hielo de agua. Para poder subsanar este hecho, es necesario rebajar la densidad del magma mediante la introducción de una fase gaseosa, o subir la densidad de la corteza de donde parten permitiendo una composición más compleja que el hielo puro de agua.

Entre los hielos, es de especial interés el comportamiento de los clatratos de gas. Estos materiales están formados por moléculas de agua en estado sólido pero cuya estructura cristalina deja un hueco en la celda en donde puede meterse un gas. El campo de estabilidad de los clatratos depende del tipo de molécula huésped, aunque preferentemente se localiza en temperaturas frías y altas presiones. La destrucción de estos materiales conlleva la liberación de grandes volúmenes de volátiles que anteriormente estaban encerrados en las celdas del sólido. Tanto si la disociación ocurre con generación de un líquido o no, la liberación del gas suele ocurrir de forma explosiva. Estos hielos son estables en muchos puntos del Sistema Solar exterior, y han sido denunciados como responsables de la actividad criomagmática en satélites como Europa y Encelado (Prieto-Ballesteros et al. 2005, Prieto-Ballesteros y Kargel 2006).

**LOS SATÉLITES MAS ACTIVOS DEL SISTEMA SOLAR.**

Aunque se pueden encontrar evidencias de criomagmatismo antiguo en muchos satélites de hielo, hay tres de ellos que destacan por la intensa actividad que han sufrido o que incluso mantienen en tiempos presentes. Estos son: Europa (satélite de Júpiter), Encelado (satélite de Saturno) y Tritón (satélite de Neptuno).

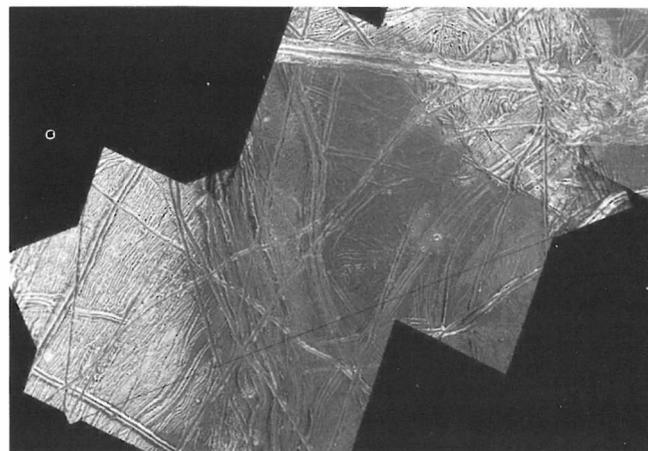


Figura 1: *Imagen PIA01405 de Europa tomada por la sonda espacial Galileo. El área oscura central está formada por materiales criomagmáticos depositados sobre terrenos más brillantes afectados por tectónica.*



FIGURA 2: Imagen PIA03878 en falso color capturada por la sonda espacial Galileo. Las estructuras semicirculares se han interpretado como diapiros de material que han ascendido por la corteza de Europa.

## 1. Europa.

Es el satélite de hielo más cercano al Sol. Su tamaño y densidad son parecidos a los de nuestra Luna (tabla 1). Este último dato nos indica que en el interior se albergan materiales pesados que compensan la densidad del hielo, como pueden ser silicatos o incluso metales. Aunque los elementos radiactivos deben proporcionar energía al satélite, la mayor parte es generada por las mareas con Júpiter. Las tensiones gravitatorias se reflejan incluso en un particular estilo de fracturación de la corteza rígida, que forma fallas curvadas que se abren al son de los esfuerzos corticales cíclicos de marea. La energía del satélite ha sido suficiente a lo largo del tiempo para diferenciar el interior en capas, lixiviando los materiales menos pesados hacia la superficie, y llegando a formar un océano global bajo la superficie de hielo. Los materiales detectados mediante espectrometría infrarroja se han clasificado en tres grupos diferentes (McCord et al., 1998): a) hielo de agua, que constituye la composición principal de la superficie y probablemente de la corteza; b) mezclas de hidratos de sulfatos y/o ácido sulfúrico (sulfatitas), localizadas en su mayoría en el hemisferio de arrastre y asociados a las numerosas fracturas que cortan la superficie, por donde parece que han ascendido y que indica un origen interno; c) otros hielos formados de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y/o clatratos de gas.

La superficie de Europa es muy joven, ha sido renovada por tectónica y criomagmatismo hasta hace poco tiempo, si no lo sigue siendo en la actualidad. Entre las estructuras criomagmáticas destacan depósitos de sulfatitas de bajo albedo asociados con criovulcanismo fisural (Fig. 1) y morfologías dómicas cuasi-circulares de diverso tamaño y origen intrusivo (Fig. 2). Una vez en superficie, las sulfatitas se alteran por efecto del ambiente de alta radiación del sistema de Júpiter, cambiando su color y albedo.

Se han propuesto varios mecanismos para explicar el difícil ascenso de los criomagmas en la corteza de Europa, como efectos de sobrepresión en cámaras magmáticas. Recientemente se ha sugerido el ascenso de los criomagmas por la corteza de hielo de agua por cristalización fraccionada de sulfatitas ricas en volátiles (Prieto-Ballesteros y Kargel 2006).

## 2. Encelado.

El diámetro de Encelado es de apenas 504 Km., algo más de la mitad de la anchura de la Península Ibérica, y su densidad

ronda la del agua ( $1.4 \text{ g/cm}^3$ ), pero aún así se ha revelado como un cuerpo planetario muy interesante por su actividad geológica actual. Su reflectividad es la más alta del Sistema Solar, debida al hielo de agua predominante en la superficie. La renovación de la superficie, marcada sobre todo por la tectónica, parece afectar más a un hemisferio que a otro, en donde han quedado grabados un mayor número de cráteres procedentes de tiempos pasados (Fig. 3).

La observación de actividad criomagmática en Encelado durante Julio de 2005 ha sido uno de los grandes descubrimientos de la misión Cassini-Huygens. La sonda espacial ha tomado imágenes de alta resolución del polo sur del satélite mientras se estaban produciendo emanaciones de partículas y vapor de agua (Fig. 4). Afortunadamente, al mismo tiempo de la captura de las imágenes, se midieron anomalías térmicas en la zona de origen de dichas emanaciones mediante espectrometría infrarroja (Spencer et al. 2006), y su composición mayoritaria de agua y dióxido de carbono se determinó con el espectrómetro de masas (Waite et al., 2006). Ya anteriormente se había sugerido que Encelado podría ser activo actualmente, y asimismo ser la fuente de las partículas que constituyen el anillo E de Saturno, lo cual ha quedado confirmado. No está claro aún cómo se forman los géiseres, ni cómo puede acumular tanta energía un satélite de las características de Encelado. Se han propuesto tres hipótesis para generar las emanaciones observadas, que se debaten entre la sublimación del hielo de agua, la vaporización desde una cámara magmática presurizada y el ascenso de líquidos de punto de fusión rebajado, como el sistema  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  (Porco et al. 2006).

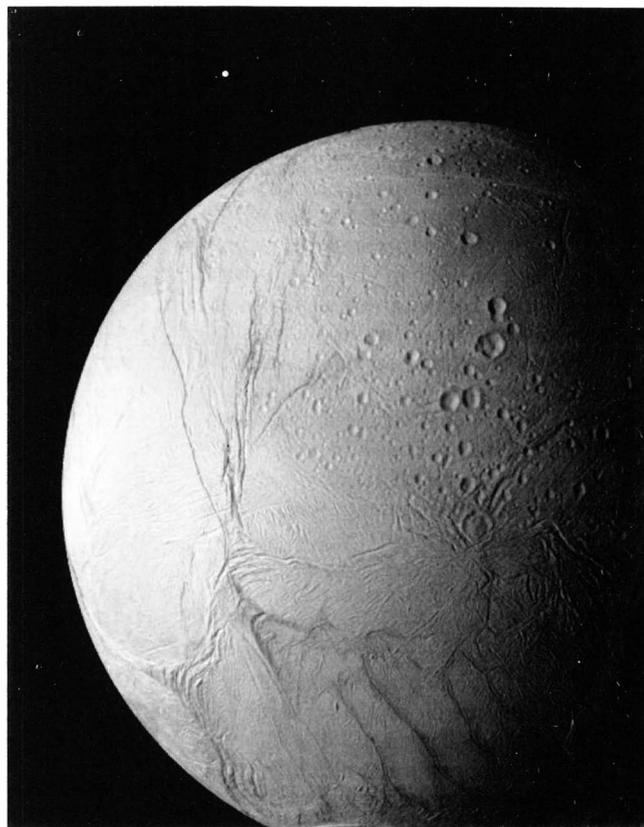


FIGURA 3: Imagen PIA07800 de Encelado tomada por la sonda Cassini en donde se puede observar la dicotomía entre un hemisferio más afectado por cráteres y el otro que ha sufrido una renovación más intensa. Sobre las fracturas paralelas de la parte inferior del satélite se han medido temperaturas anómalamente altas, por lo que se ha sugerido que son el foco de las emanaciones de partículas.

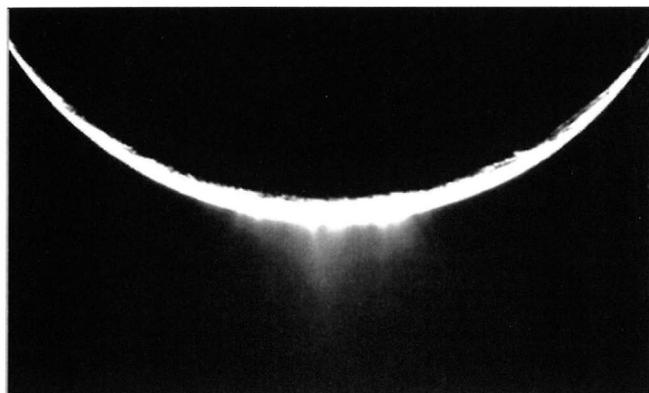


FIGURA 4: Imagen PIA07762 de la sonda Cassini que muestra la erupción de partículas desde el polo sur del satélite Encelado.

### 3. Tritón.

Tritón es un satélite de características especiales (Fig. 5). Tiene un diámetro de 2700 Km. y una densidad de  $2.04 \text{ g/cm}^3$ , sólo superada por Europa. No hay evidencias espectroscópicas de hielo de agua en la superficie, mientras que prevalecen las señales de los hielos de nitrógeno (cuya temperatura de fusión es de  $-235^\circ \text{C}$ ) y metano. Sin embargo, esto no significa que el hielo de agua no esté presente de forma abundante en el interior. Además, es de los pocos satélites que cuenta con una atmósfera estable, aunque tenue. Ésta es de nitrógeno y sufre variaciones estacionales por condensación parcial en cada uno de los polos.

La alta proporción de silicatos y, por ende, de elementos radiactivos, así como la inusual órbita del satélite hacen presagiar gran cantidad de energía acrecional y radiogénica, suficiente incluso para mantener la actividad criomagmática hasta la actualidad (Croft et al. 1995). Las imágenes de los Voyager desvelaron una superficie cuajada de estructuras criomagmáticas, ya reconocidas en otros satélites: cuerpos intrusivos de morfología circular en los terrenos Cantalupe, que dominan más del 30% del total de la superficie del satélite (Schenk y Jackson 1993), inundaciones criolávicas de estructuras circulares parecidas a los terrenos-maria de la Luna, y emanaciones fumarólicas de materiales oscuros que alcanzan alturas de hasta 8 Km. Las fumarolas dejan largos rastros en la superficie a favor de los vientos dominantes de la atmósfera. Algunos investigadores han propuesto un nuevo tipo de proceso magmático para explicar las fumarolas, fundado en el aumento de temperatura alcanzado por el efecto invernadero que produce el hielo de nitrógeno cuando se encuentra sobre materiales oscuros, poco compactados y de baja conductividad térmica.

### CONCLUSIONES

A pesar de las bajas temperaturas reinantes en el Sistema Solar exterior, las imágenes de las misiones espaciales han revelado que hay cuerpos planetarios sólidos que han mantenido la actividad geológica hasta la actualidad. Algunos satélites de hielo muestran evidencias de albergar océanos de agua líquida bajo sus superficies congeladas. La existencia de agua líquida es, desde el punto de vista astrobiológico, una de las premisas que restringe la habitabilidad de un planeta. Así pues, algunos de los satélites de hielo como Europa son objetivos prioritarios de estudio para las agencias espaciales, y por tanto de futuras sondas de exploración al Sistema Solar exterior.

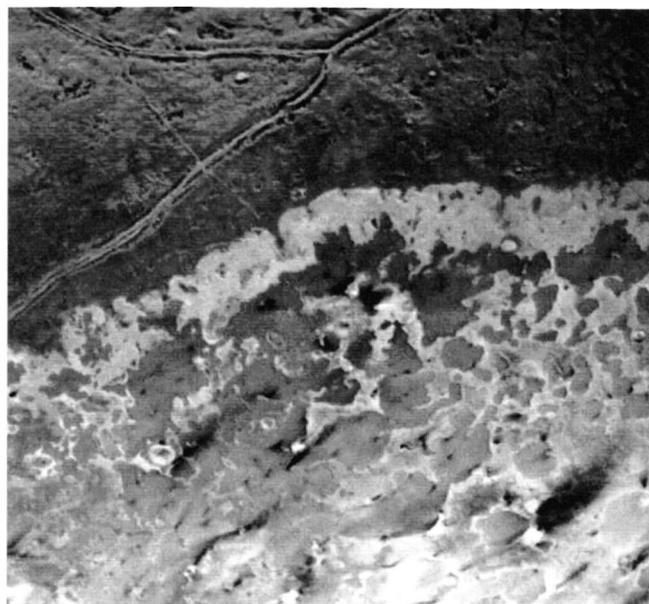


FIGURA 5: Imagen PIA00059 del polo sur de Tritón tomada por el Voyager 2. Se puede observar en ella las fumarolas y huellas de los depósitos de partículas de color oscuro arrastrados por el viento.

### REFERENCIAS

- Anders, E. y Grevesse, N. (1989): Abundance of the elements: meteoritic and solar. *Geochem. Cosmochim. Acta* **53**, 197-214.
- Croft, S.K., Lunine, J.I. y Kargel J.S. (1988): Equation of state of ammonia-water liquid: derivation and planetological application. *Icarus* **73**, 279-293.
- Croft, S.K., Kargel, J.S., Kirk, R.L., Moore, J.M., Schenk, P.M., and Strom R.G. (1995): The geology of Triton. En *Neptune and Triton*. Ed. D.P. Cruikshank. Arizona Press.
- Kargel, J.S. (1991): Brine volcanism and the interior structures of asteroids and icy satellites. *Icarus* **94**, 368-390
- Kargel, J.S. (1995): Cryovolcanism on the icy satellites. *Earth, Moon and planets* **67**, 101-113.
- Lewis, J.S. (1971): Satellites of the outer planets: their physical and chemical nature. *Icarus* **15**, 174-185
- Lewis, J.S. (1972): Low-temperature condensation in the solar nebula. *Icarus* **16**, 241-252.
- McCord, T. B. et al. (1998): Non-water ice constituents in the surface material of the icy Galilean satellites from the Galileo Near Infrared Mapping Spectrometer (NIMS) investigation. *J. Geophys. Res.* **104**, 11827-11851.
- Porco, C.C. et al. (2006): Cassini observes the active south pole of Enceladus. *Science* **311**, 1393-1401
- Prieto-Ballesteros, O. et al. (2005): Evaluation of the possible presence of clathrate hydrates in Europa's icy shell or seafloor. *Icarus* **177**, 491-505.
- Prieto-Ballesteros, O. y Kargel, J.S. (2006): Clathration as a process for cryomagmatic differentiation of icy satellites: applications to Enceladus and Europa. *LPSC* **37**, 1971.
- Schenk, P., y M.P.A. Jackson (1993). Diapirism on Triton: a record of crustal layering and instability. *Geology* **21**, 299-302
- Spencer, J.R. et al. (2006): Cassini encounters Enceladus: background and the discovery of a south polar hot spot. *Science* **311**, 1401-1405.
- Waite, J.H. et al. (2006): Cassini ion and neutral mass spectrometer: Enceladus plume composition and structure. *Science* **311**, 1419-1422.