

# Hecates Tholus, Marte: Inestabilidad del Edificio Volcánico

## *Hecates Tholus, Mars: Instability of the Volcanic Edifice*

M.A. de Pablo <sup>(1)</sup>, I. López <sup>(2)</sup>, F. Martín-González <sup>(2)</sup> y A. Márquez <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geología. Universidad de Alcalá. 28871 Madrid. España. miguelangel.depablo@uah.es

<sup>(2)</sup> Área de Geología. ESCET. Universidad Rey Juan Carlos. 28993 Madrid. España.

### ABSTRACT

*Hecates Tholus is a volcano located at the Elysium volcanic province in the Martian lowlands (32°N, 210°W). In addition to several nested calderas, the volcano shows several geological and geomorphological features that could be indicative of a complex volcanic evolution: channels, depressions, pits, faults and ridges, and a complex volcano topography. The processes that can explain the structural evolution of the volcano, include: (1) volcanic spreading, (2) lateral volcanic activity, (3) development of large landslides, (4) hydrothermal activity, and (5) tectonic deformation. We discuss these hypotheses and their implications, in order to establish the most feasible volcanic history of Hecates Tholus.*

**Key words:** *Volcanism; Spreading; Hydrothermal activity; Mars*

*Geogaceta, 42 (2007), 3-6  
ISSN: 0213683X*

### Introducción

Hecates Tholus es un volcán de unos 165 km de diámetro y unos 8000 m de altura situado en la región volcánica de Elysium (32°N, 210°W), en las tierras bajas del hemisferio Norte de Marte (Fig. 1). Este volcán, que algunos autores (ej. Neukum *et al.*, 2004) piensan que ha estado activo durante más de 4000 M.a., se caracteriza por la existencia de un complejo de calderas en su cima, una gran depresión abierta en su ladera NW, y una distribución espacial irregular de canales y cráteres de impacto en sus laderas.

En este trabajo se analiza la morfología del volcán en su conjunto, y de algunos de sus rasgos más particulares observables en sus flancos: escarpes, crestas, terrazas, canales y cadenas de depresiones. Finalmente se discuten los posibles procesos que han podido dar lugar a estos rasgos y se propone un modelo capaz de explicar todas estas morfologías de manera conjunta en el contexto del edificio volcánico. Para llevar a cabo este estudio se ha empleado imágenes de muy diversa resolución (de 2 a 250 m/p) procedentes de diferentes sondas, y un modelo digital de elevaciones (463 m/p) que han sido integrados en un Sistema de Información Geográfica (con el software ArcGIS 9.0) mediante el cual se realizó el análisis geomorfológico y geológico de este edificio volcánico.

### Análisis estructural

La cartografía geomorfológica y estructural de Hecates Tholus presenta dife-

rentes rasgos de origen tectónico que indican distintos estilos de deformación del volcán a lo largo de su evolución (Fig. 2).

En la parte central e inferior de las laderas Este y Noreste se localizan una serie de terrazas parcialmente concéntricas, similares a las estructuras interpretadas como fallas inversas en las laderas del volcán Olympus Mons de Marte (Thomas *et al.*, 1990). Aunque menos claras en las imágenes, los mapas topográficos y de pendientes de Hecates Tholus también revelan la existencia de algunas terrazas de este tipo en la ladera Sur del volcán.

En la parte central de la ladera Noreste del volcán se han observado una serie de crestas concéntricas a la caldera central, mientras que en la ladera Noroeste existe una serie de crestas de dirección SO-NE, que hemos interpretado en este trabajo como fallas inversas.

Las laderas de Hecates Tholus también presentan estructuras extensionales, como un posible graben en la ladera Sureste del edificio, de dirección SO-NE. En los flancos Sur y Sureste, y en algunos lugares alrededor del volcán, aparecen otros escarpes, más recientes que los sistemas de terrazas concéntricas previamente descritas.

Se han observado en todas las laderas abundantes cadenas de depresiones dispuestas de forma radial a la cumbre, aunque se encuentran más desarrolladas en la dirección NE-SO. Estas depresiones son el rasgo estructural más reciente de los observados y se interpretan como evidencia de la existencia de fracturas bajo la

superficie (Ferrill *et al.*, 2004), o como manifestación superficial de la presencia de diques (ej. Montési, 2001).

### Análisis morfológico

#### *Morfología general del volcán*

Hecates Tholus es un edificio volcánico cónico de pendientes inferiores a 10° con irregularidades en su morfología. Presenta una base elíptica (180 x 146 kilómetros) elongada en dirección N100°E. El análisis de las curvas de nivel (Fig. 3A) ha mostrado que esta elipticidad no es constante, sino que se reduce claramente hacia la cima. Además la vertiente Sur tiene una mayor pendiente que la vertiente Norte, aunque esta asimetría puede estar relacionada con la inclinación regional de 5° hacia el Norte. En la parte NE del volcán hay un ensanchamiento de la base donde el terreno tiene una textura más irregular y caótica. Por otra parte, los mapas topográfico y de pendientes muestran que la cima tiene una superficie más regular y uniforme que el resto del edificio (Fig. 3A y Fig. 3B). Una serie de perfiles topográficos, realizados de forma radial en todo el edificio, permite observar estas irregularidades, además de las laderas escalonadas o con terrazas y la diferencia de altura de más de 1000 m entre la base del volcán en sus distintas vertientes (Fig. 3C). Los perfiles también muestran la existencia de un abultamiento en la ladera Noreste del edificio volcánico (la ladera en este flanco tiene una geometría cóncavo-convexo-cóncavo).

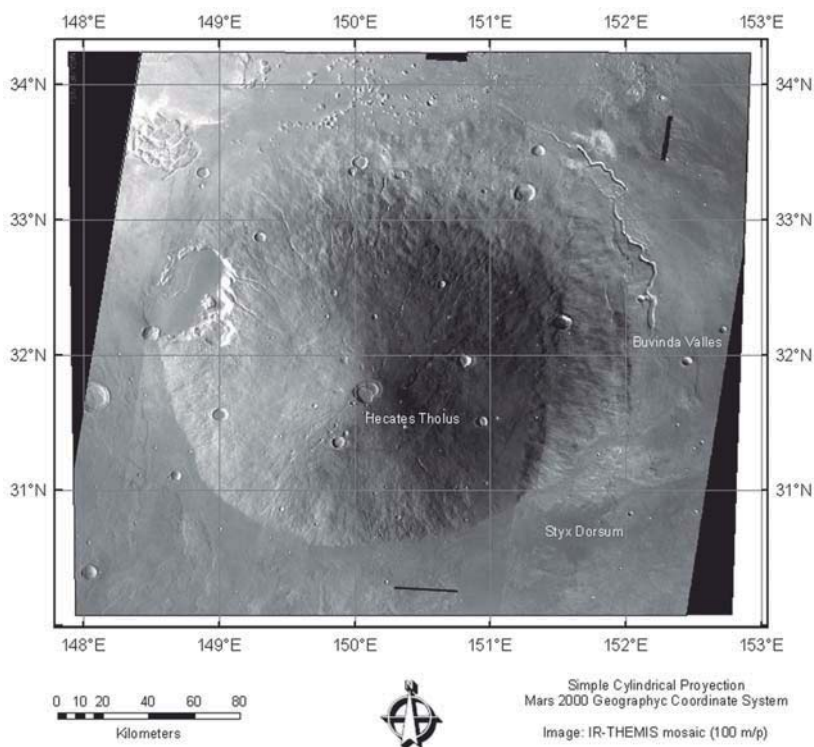


Fig. 1.- Mosaico de imágenes THEMIS (infrarrojo diurno) de Hecates Tholus, Marte (32°N,210°W).

Fig. 1.- THEMIS (diurnal infrared) images mosaic showing Hecates Tholus volcano, Mars (32°N,210°W).

a lo largo de cada canal. Las zonas de encajamiento coinciden con los escalones o terrazas de los flancos previamente descritos. Debido a la resolución del modelo digital de elevaciones, no es posible cuantificar el grado de encajamiento de los canales. Estos encajamientos, al igual que los escalones, son escasos o inexistentes en el flanco Sur del volcán.

*Depresión NO*

En la base de la ladera Noroeste, existe una extensa depresión de morfología elíptica (orientación SO-NE) y paredes verticales de hasta 3000 m (A en Fig. 2). Cubriendo el fondo y parte de las paredes de esta gran depresión se han descrito materiales de origen glaciar (Neukum *et al.*, 2004; Hauber *et al.*, 2005). Otra depresión de forma semicircular (15 km de diámetro y 1000 m de profundidad) localizada a mitad de la ladera se encuentra superpuesta a la anterior (A' en Fig. 2). Esta depresión, de fondo irregular e interpretada como una caldera de explosión resultado de una erupción lateral en Hecates Tholus (Neukum *et al.*, 2004; Hauber *et al.*, 2005), está abierta en su lado NO comunicándose con la anterior a través de un salto topográfico de unos 1500 m. Alrededor de la depresión se han descrito unos materiales de textura rugosa que tapizan la ladera del volcán y que estos autores han interpretado como depósitos piroclásticos.

**Discusión**

Cada uno de los rasgos anteriormente descritos podría ser explicado por distintos procesos geológicos relacionados con la evolución tectónica, el vulcanismo, la actividad fluvial, o glaciar. A continuación se discute brevemente los que creemos que pueden ser más adecuados en función de las condiciones geológicas y ambientales de la zona de estudio.

*Deformación tectónica*

Tanto la elipticidad del volcán como los distintos sistemas de escarpes, crestas, y cadenas de depresiones pueden ser el resultado de distintos episodios de deformación tectónica del volcán. La dirección de elongación del volcán se corresponde con la de las fracturas regionales con vulcanismo asociado que surcan la región de Elysium (por ejemplo: Elysium Fossae). Esto podría hacer suponer que este volcán tiene una cierta componente fisural que ha ido perdiendo a medida que ha ido creciendo el edificio. Esta hipótesis también podría explicar la variación de elipticidad desde

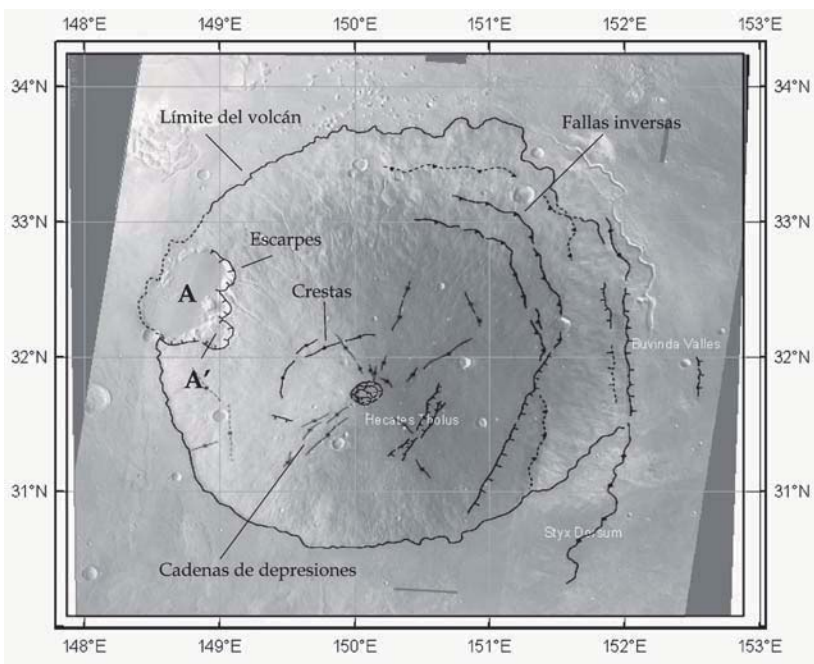


Fig. 2.- Mapa de estructuras tectónicas de Hecates Tholus en el que se observan las crestas, escarpes y cadenas de depresiones en los distintos flancos del volcán, indicando una compleja historia de esfuerzos.

Fig. 2.- Structural map of Hecates Tholus volcano showing ridges, scarps and pit chains, reflex of the complex stress evolution of this volcano.

*Canales con encajamiento variable*

Otra de las características morfológicas de Hecates Tholus es la presencia de abundantes canales desarrollados en todas las laderas excepto en el flanco SO. Algunos

de estos canales tienen su origen en las cadenas de depresiones circulares o elípticas previamente descritas. Una característica de estos canales es que muestran alternancias en el grado de encajamiento

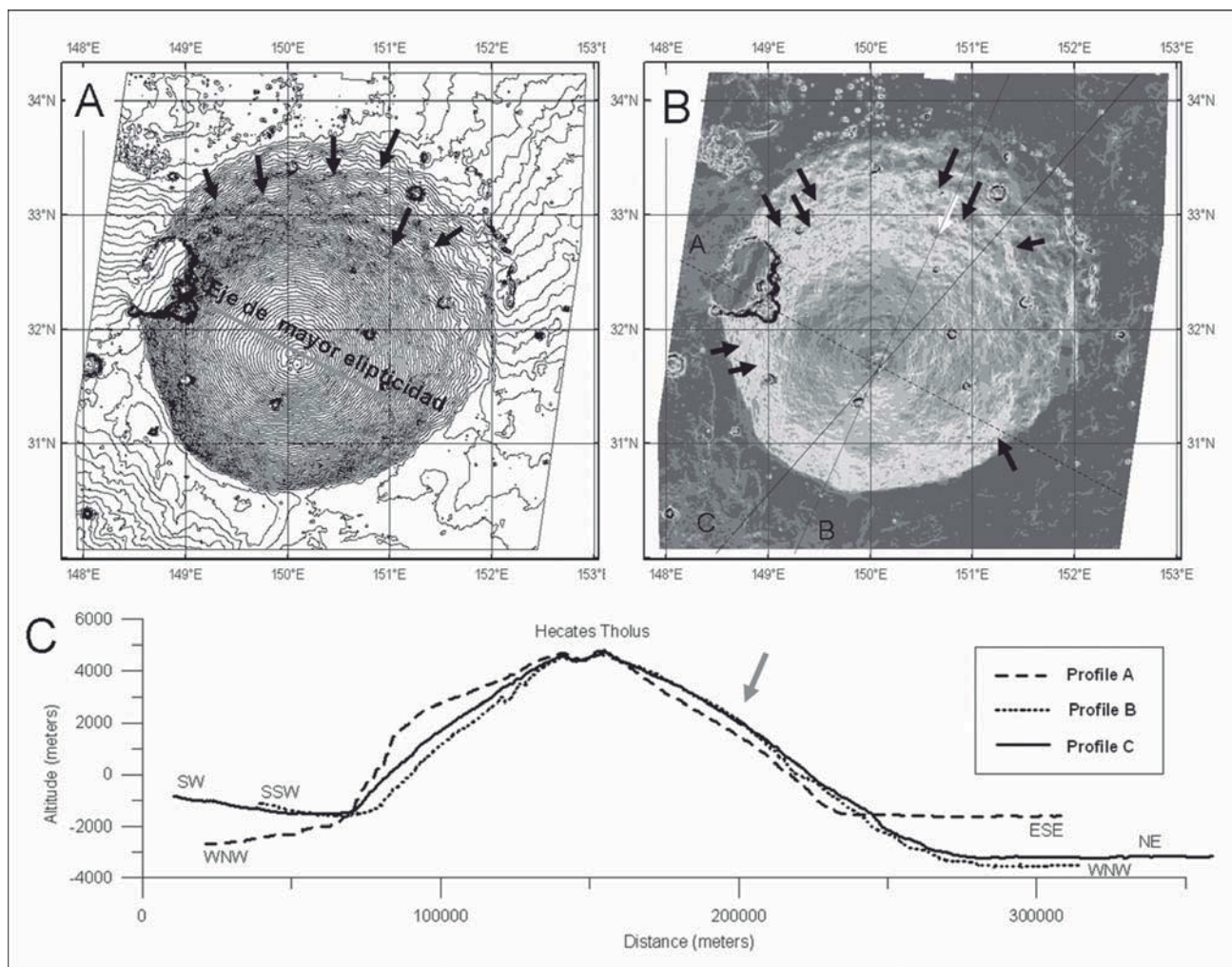


Fig. 3.- (A) Mapa de topográfico de Hecates Tholus en el que se puede observar su ligera elipticidad. Las curvas de nivel (100 m. de equidistancia) marcan las variaciones en la rugosidad de los flancos y la presencia de terrazas (Flechas). (B) Mapa de pendientes del volcán en el que destacan las laderas escalonadas o con terrazas (Flechas). (C) Perfiles topográficos de Hecates Tholus en el que se puede observar un abultamiento en la parte superior y central de la ladera Norte (Flecha gris).

Fig. 3.- (A) Topographic map of Hecates Tholus (equidistance: 100 m) where is marked its ellipticity and the existence of terraces on the flanks (Arrows). (B) Slopes map of the volcano showing changes on flanks texture and the existence of terraces (Arrows). (C) Selected topographic profiles radial to the volcano showing a bulge on upper and middle Northern flank (Grey arrow).

la base hacia la cumbre de dicho edificio, previamente descrita.

Para explicar las distintas estructuras compresivas y extensionales existentes en el edificio, es necesario suponer que el edificio ha sufrido una evolución estructural compleja con episodios donde predominan los esfuerzos locales compresivos, (generando las crestas y terrazas en los flancos del volcán), que evolucionan posteriormente a un régimen tensional (generando escarpes y grabens). El episodio compresivo podría estar relacionado con el apilamiento sobre el flanco Sur de Hecates Tholus, de las coladas de lava procedentes de Elysium Mons. En último lugar, las cadenas de depresiones indican un nuevo episodio distensivo (bien por tectónica, o bien por intrusión de diques). Las direcciones de las estructuras observadas en Hecates Tholus, son incompatibles con un

único campo de esfuerzo, lo que, junto con las relaciones de corte de las distintas estructuras, indica la existencia de distintos episodios tectónicos.

#### Actividad volcánica lateral

Relacionado con el posible origen magmático de las cadenas de depresiones (ej. Montési, 2001), y el evento volcánico lateral que pudo dar lugar a una de las depresiones del flanco NO del volcán (Hauber *et al.*, 2005), en Hecates Tholus podrían haber tenido lugar numerosos episodios de actividad magmática a lo largo de su evolución. Aunque no se han observado rasgos superficiales en los flancos del volcán que permitan deducir la existencia de sills, pudo producirse cierto desplazamiento lateral de magma para dar lugar a la erupción lateral interpretada para el flanco NO. Aunque en

este trabajo no se han encontrado indicios, la gran depresión de esa ladera también podría haber sido producida por una gran erupción lateral anterior, ya que no se encuentran restos de un posible deslizamiento, como se discute más adelante.

Por otra parte, tanto si se han formado diques, como si existe una cámara magmática lateral bajo la parte Oeste del edificio, los materiales que constituyen el edificio podrían estar alterados térmica o hidrotermalmente.

#### Sistema hidrotermal

La relación entre canales y las cadenas de depresiones podría indicar la existencia de un sistema hidrotermal en este volcán, lo cual es compatible con cualquiera de los posibles orígenes de estas cadenas de depresiones. La extensa distribución de las depresiones en los flancos del volcán po-

dría indicar una actividad hidrotermal distribuida por todo el edificio. Sin embargo, no se observa una especial relación entre las cadenas de depresiones, los canales y la subdepresión del flanco NO del edificio, interpretada como una caldera de explosión (Hauber *et al.*, 2005).

#### *Materiales de baja resistencia y evolución estructural del edificio.*

En general, la actividad hidrotermal produce alteraciones en los materiales volcánicos (ej. argilización; Lopez y Williams, 1993). Estos materiales alterados presentan unas características mecánicas distintas y forman niveles de baja resistencia mecánica localizados en el interior del edificio volcánico que pueden favorecer procesos de desestabilización gravitatoria del edificio (Cecchi *et al.*, 2005).

Otra posibilidad para la existencia de procesos de desestabilización gravitatoria debido a la presencia niveles de baja resistencia es que existan de niveles de material sedimentario localizados bajo el volcán. Hecates Tholus ha sido datado como Hespérico Superior (Tanaka *et al.*, 1992). Durante ese periodo de la historia geológica de Marte, en el hemisferio Norte se ha propuesto la existencia de un océano cuya línea de costa estaría junto a Hecates Tholus (ej. Fairén *et al.*, 2003) lo que podría explicar la presencia de niveles de origen sedimentario y de comportamiento más dúctil. La presencia de materiales alterados dentro del volcán y/o la presencia de niveles sedimentarios bajo el mismo puede dar lugar a una deformación compleja del edificio, tal y como muestran los modelos analógicos desarrollados para el estudio de estos casos (Cecchi *et al.*, 2005; Oehler *et al.*, 2005). Las asimetrías y perfiles concavo-convexo-concavo mostrados en esos modelos son similares a los observados en los perfiles topográficos del flanco Norte de Hecates Tholus (Fig. 3C). Los campos de esfuerzo que se generarían en el volcán podrían explicar los rasgos de deformación observados en las laderas (crestas concéntricas y terrazas).

Otra posible consecuencia de la presencia de materiales dúctiles en el interior o en la base del volcán es la formación de deslizamientos (van Wyk de Vries y Matela, 1998; Cecchi *et al.*, 2005; Oehler *et al.*, 2005). El aspecto irregular de los materiales situados en la base NE de Hecates Tholus, localizados levemente fuera del contorno elíptico del volcán, podría llevar a interpretarlos como productos de un posible deslizamiento. Por otra parte, la depresión de forma elíptica situada en el flanco NO del volcán, también podría tratarse de un gran deslizamiento múltiple.

No existen descripciones previas sobre el origen de esta depresión, pero su morfología es muy similar a otros deslizamientos ocurridos en la Tierra (ej. Vannest *et al.*, 2006). La ausencia de materiales asociados al posible deslizamiento podría ser un factor en contra de esta hipótesis de trabajo, sin embargo estos podrían encontrarse cubiertos parcialmente por las coladas de lava procedentes de Elysium Mons, y que podrían estar rellenando incluso la propia depresión.

#### **Inestabilidad de Hecates Tholus**

A la vista de las observaciones realizadas en este trabajo y de las posibles interpretaciones para los rasgos analizados en el volcán, es posible plantear una hipótesis sobre las condiciones geológicas de Hecates Tholus.

Parte de los materiales del interior del volcán podrían encontrarse alterados por la actividad hidrotermal (Mouginis-Mark, 1985; Fasset y Head, 2006), o el vulcanismo lateral (Hauber *et al.*, 2005). Además, en la base del volcán podrían encontrarse interestratificaciones de materiales marinos y volcánicos de distinta reología (coladas de lava, cenizas volcánicas,...) debido a la proximidad del volcán a una posible línea de costa (ej. Fairén *et al.*, 2003). La presencia de un núcleo alterado, y de una base con posibles intercalaciones de materiales más dúctiles son algunas de las condiciones principales para que se produzca la deformación del volcán y se desarrollen deslizamientos de flanco y colapsos, de acuerdo con los modelos existentes (Cecchi *et al.*, 2005; Oehler *et al.*, 2005). En este contexto, los distintos rasgos morfológicos y estructurales estudiados en este trabajo podrían interpretarse de la siguiente manera: (1) la presencia de crestas y terrazas concéntricas al volcán podrían ser indicadores de la deformación de la parte superior del edificio; (2) el terreno de aspecto irregular y caótico en la base NE del volcán podría ser el reflejo de deslizamientos; y (3) la depresión elíptica del flanco NO podría ser el resultado de un gran deslizamiento.

De esta manera, establecemos que Hecates Tholus se podría encontrar en un estado de gran inestabilidad en la que se han podido producir asentamiento de la parte superior del edificio, y deslizamientos en la parte inferior de la ladera NE y NO. No podemos descartar otras interpretaciones para cada uno de los rasgos de manera individual, pero nuestra hipótesis permite explicar todos los rasgos del edificio volcánico de ma-

nera conjunta y coherente. Será necesario realizar nuevos estudios de detalle con los datos de las sondas *Mars Express* y *Mars Reconnaissance Orbiter* con el fin de analizar en profundidad cada uno de los rasgos aquí descritos para comprobar la hipótesis propuesta en este trabajo.

#### **Referencias**

- Thomas, P.J., Squyres, S.W. y Carr, M.H. (1990). *Journal of Geophysical Research*, 95, 14345-14355.
- Cecchi, E., van Wyk de Vries, B. y Lavest, J. (2005). *Bulletin of Volcanology*, 67, 72-91.
- Fairén, A.G., Dohm, J.M., Baker, V.R., de Pablo, M.A., Ruiz, J., Ferris, J.C. y Anderson, R.C. (2003). *Icarus*, 165, 53-67.
- Fasset, C.I. y Head, J.W. (2006). *Planetary and Space Science*, 54, 370-378.
- Ferrill, D.A., Wyrick, D.Y., Morris, A.P., Sims, D.W. y Franklin, N.M. (2004). *GSA Today*, 14, 4-12.
- Hauber, E., van Gasselt, S., Ivanov, B., Werner, S., Head, J.W., Neukum, G., Jaumann, R., Greeley, R., Mitchell, K.L., Muller, P. y The HRSC Co-investigator Team. (2005). *Nature*, 434, 356-361.
- López, D. y Williams, S. (1993). *Science*, 260, 1794-1796.
- Montési, L.G.J. (2001). En: *Mantle plumes: their identification through time* (R.E. Ernst y K.L. Buchan, Ed.). Geological Society of America. Special Paper, 352, 165-181.
- Mouginis-Mark, P.J. (1985). *Icarus*, 64, 265-284.
- Neukum, G., Jaumann, R., Hoffmann, H., Hauber, E., Head, J.W., Basilevsky, A.T., Ivanoc, B.A., Werner, S.C., van Gasselt, S., Murria, J.B., McCord, T. y The HRSC Co-investigator Team. (2004). *Nature*, 432, 971-979.
- Oehler, J.F., van Wyk de Vries, B. y Labazuy, P. (2005). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 144, 169-189.
- Tanaka, K.L., Chapman, M.G. y Scott, D.H. (1992). *United States Geologic Survey, Miscellaneous Investigations Series*. Map I-2147.
- van Wyk de Vries, B. y Matela, R., (1998). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 81, 1-18.
- Vannest, M., Mienert, J. y Bünz, S. (2006). *Earth and Planetary Science Letters*, 245, 373-388.
- William, D.A., Greeley, R., Hauber, E., Gwinner, K. y Neukum, G. (2005). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 110. 10.1029/2004JE002377.