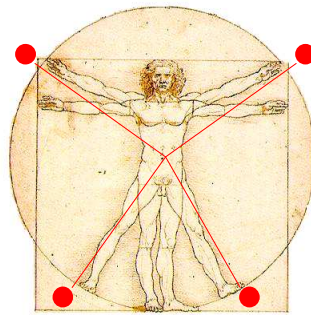


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

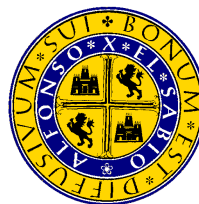
VOLUMEN VIII. AÑO 2010

SEPARATA



LA IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL MODELADO DE LA REGIÓN
DE NEPENTHES MENSÆ, MARTE

Alberto Valenciano y Miguel Ángel de Pablo



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Alberto Valenciano y Miguel Ángel de Pablo
Diciembre, 2010
http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECMAD10_008.pdf

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*
Escuela Politécnica Superior.
Universidad Alfonso X el Sabio.
28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).
ISSN: 1696-8085

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

Tecnol@ y desarrollo. ISSN 1696-8085. Vol.VIII. 2010.

LA IMPORTANCIA DEL AGUA EN EL MODELADO DE LA REGIÓN DE NEPENTHES MENSÆ, MARTE

Alberto Valenciano (1) y Miguel Ángel de Pablo (2)

(1) Facultad de Biología. Universidad de Alcalá. 28871 Madrid. España. alb3rtovv@gmail.com

(2) Departamento de Geología. Universidad de Alcalá. 28871 Madrid. España.
miguelangel.depablo@uah.es

RESUMEN:

El agua es un importante agente en el modelado del paisaje en la Tierra y, a la luz de los rasgos observados en la superficie de Marte, también en nuestro planeta vecino. Los estudios geomorfológicos de las imágenes de satélite enviadas por distintas sondas planetarias han permitido proponer la existencia de canales, lagos, mares y un océano en la superficie de Marte a lo largo de su historia geológica. Ahora, gracias a los datos de alta resolución, es posible conocer, ya no de forma global, sino de forma local y detallada, el papel que el agua ha jugado en el modelado del relieve en distintas regiones del planeta. En este trabajo se presentan los resultados del estudio regional de una zona ecuatorial de Marte: Nepenthes Mensae, en la que distintos autores han apuntado la presencia de distintos rasgos geomorfológicos relacionados con el agua. Para ello se han analizado todas las imágenes THEMIS disponibles de la zona con el objetivo de valorar el papel que el agua ha jugado en la historia geológica de esta región y que servirá de base para estudios futuros más detallados.

PALABRAS CLAVE: Marte, agua, geomorfología, teledetección

ABSTRACT

Water is a major player in shaping the landscape on Earth and it had an important role in the martian landscape evolution such as reveal the different water-related features observed in the satellite images from Mars. Geomorphological studies of remote sensing data acquired by several spacecrafts allowed propose the existence of canals, lakes, seas and an ocean on Mars' surface throughout its geological history. Now, thanks to high-resolution data, it is possible to know the global but also the local role that water has played in sculpting the Martian surface. Here we present the results of our detailed geomorphological study of an equatorial region of Mars: Nepenthes Mensae, in which different authors have noted the presence of water-related geomorphological features. We have analyzed all available THEMIS images of the area with the aim to assess the role that water has played in the geological history of this region and will serve as a basis for more detailed future studies.

KEY-WORDS: Mars, Water, geomorphology, remote sensing

SUMARIO: 1.Introducción, 2.Zona de estudio: Nepenthes Mensae, 3.Datos y métodos, 4. Resultados, 5. Discusión, 6. Conclusiones, 7. Agradecimientos, 8.Bibliografía.

http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECMAD10_008.pdf

1. Introducción

La presencia de agua en Marte, que tanto ha sido estudiada y debatida en la comunidad científica, parece estar confirmada recientemente gracias a los datos espectrométricos facilitados, por ejemplo, por el sensor CRISM a bordo de la sonda *Mars Reconnaissance Orbiter* (Murchie et al., 2007,) así como por los estudios y análisis in situ realizados por algunos de las sondas de amartizaje y vehículos que se han posado en la superficie de nuestro planeta vecino, como *Spirit*, *Opportunity* o *Phoenix* (ej. Squyres et al., 2004; Haskin et al., 2005; Ash, 2008).

Gracias a los datos adquiridos por los sensores instalados a bordo de distintas sondas planetarias, especialmente imágenes de muy diversa resolución, vamos conociendo poco a poco la geología de Marte. Así, la geografía y el paisaje de Marte y sus elementos geomorfológicos parecen indicar la existencia de varios episodios de actividad del agua durante distintos momentos de su historia geológica, incluyendo periodos muy recientes (ej. Carr, 1996, 2003; Fairén et al., 2003; Dohm et al., 2008). La mayoría de los elementos geomorfológicos relevantes del planeta son volcánicos, tectónicos y de impacto. Pero también se han descrito multitud de rasgos fluviales, glaciares, periglaciares, y lacustres (e incluso marinos), estando todos ellos asociados a la existencia de agua, ya sea en estado sólido o líquido, asumiendo que éstos se formaron de forma equivalente a los que podemos observar en la Tierra (Baker, 2006; Carr, 2006).

Con el avance de la tecnología de los instrumentos embarcados a bordo de los satélites enviados a Marte, tenemos cada vez datos más detallados de su superficie, lo que ha hecho que se hayan realizado numerosas observaciones sobre distintos rasgos geomorfológicos relacionados con el agua o el hielo (ej. Carr, 1996; Irwin et al., 2005; Christensen et al., 2005; Dundas, 2007; de Pablo y Komatsu, 2008), siendo especialmente relevante la descripción de posibles líneas de costa, que denotan la existencia de un océano en Marte, así como mares y lagos en distintos momentos de su evolución (ej. Parker, 1993; Fairén et al., 2003; de Pablo y Pacifici, 2008).

Pero no sólo se han observado con detalle los relieves de la superficie de Marte en busca de indicadores de la presencia de agua, sino que también se ha buscado huellas de agua en la composición química de los minerales del planeta (ej. Bell, 2007). Mediante el análisis de los datos obtenidos por los robots *Spirit* y *Opportunity*, de la misión *Mars Exploration Rovers* aún en activo, se ha descubierto en el suelo de determinadas regiones de Marte unas acumulaciones del mineral hematites (Squyres et al., 2004). Estos minerales podrían haberse formado por precipitación química en el agua contenida en los poros de un antiguo lecho lacustre. Además se observaron esferas dispersas por el suelo o incrustadas en la roca denominada *Upper Dells*, que han sido interpretadas causada por un curso fluvial (Christensen et al., 2005). Por otra parte, la sonda de la agencia europea del espacio (ESA), *Mars Express*, con el instrumento OMEGA, ha detectado la presencia de arcillas (minerales formados por láminas de sílice con moléculas de agua entre ellas) (Bibring, 2005). La importancia de este descubrimiento, además de confirmar una vez más que el agua es relativamente frecuente en Marte, es que la composición química de estas arcillas es la que cabría esperar de la alteración por acción del agua de los distintos tipos de

rocas volcánicas que se han encontrado en Marte (Bell, 2007). Igualmente, en otras zonas de Marte, como Meridiani Planum, se ha determinado la existencia de depósitos antiguos de rocas sedimentarias con estructura laminar y relativamente porosas, con composiciones químicas ricas en agua y con sales, lo que algunos autores lo han interpretado como debido a la sedimentación en depresiones donde el agua permaneció durante largos periodos de tiempo (Bell, 2007). Todo esto demuestra una vez más que el agua ha jugado un papel importante, en el origen de algunos materiales, pero también en su alteración.

Así, el papel del agua en el modelado de la superficie de Marte, y de la formación de nuevos materiales, o la alteración de los ya existentes, ha sido muy importante en la historia del planeta. Sin embargo, queda por conocer el papel concreto que jugó el agua en cada una de sus regiones. En el límite entre las Tierras Altas de Marte y las Tierras Bajas, en la región de Nepenthes Mensae, se han descrito diversos rasgos geomorfológicos que están relacionados con la existencia de agua, tanto en estado sólido como líquido. Por ejemplo, se han reconocido posibles líneas de costa que indicarían la variación del nivel del agua en esta región y su relación con el gran océano de Marte (de Pablo y Pacifici, 2008). También se han descrito diversos canales en esta zona (ej., Irwin et al., 2004, 2005; Tanaka et al., 2005; de Pablo y Pacifici, 2008), así como deltas (ej., Irwin et al., 2004, 2005; de Pablo y Pacifici, 2008; Kleinhans et al., 2009b). Igualmente se han descrito algunos rasgos glaciares y periglaciares en esta zona relacionados con la presencia de agua helada, así como de procesos de congelación-descongelación (de Pablo and Pacifici, 2007). Sin embargo, estos estudios son muy locales y relacionados con rasgos observados de manera puntual, siendo necesario un estudio más amplio y completo de toda la zona con el objetivo de estudiar el papel que el agua ha jugado en el modelado de esta región de Marte.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es mostrar el papel del agua en Nepenthes Mensae mediante el análisis visual de imágenes de satélite, para localizar distintos rasgos geomorfológicos que indiquen la presencia de agua, y que ayuden a conocer con más profundidad el papel que éste agua ha jugado en la historia geológica de Nepenthes Mensae (Valenciano et al., 2009), así como las posibles condiciones climáticas reinantes a lo largo de su evolución y para poder inferir si se dieron, o se dan, las condiciones abióticas necesarias para la vida tal como la conocemos en la Tierra.

2.- Zona de estudio: Nepenthes Mensae

La zona de estudio de este trabajo se centra en la región de Nepenthes Mensae, en concreto entre 5.6°S-6.6°N, y 118.0°-137.4°E, en el límite entre las Tierras Bajas del hemisferio Norte en Utopia Planitia, y las Tierras Altas del hemisferio Sur en Terra Cimmeria.

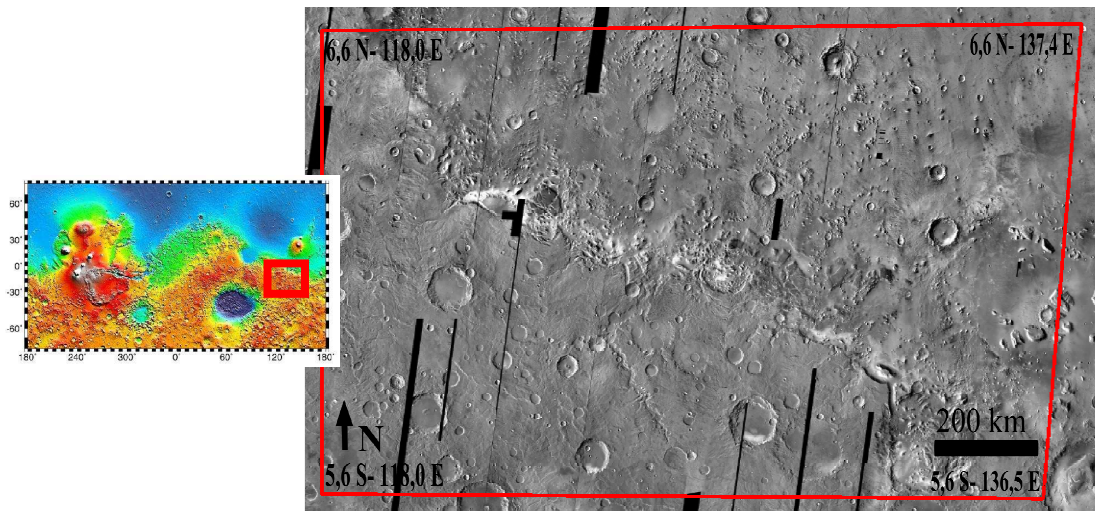


Figura 1: Mapa topográfico de Marte mostrando la localización de la zona de estudio: Nepenthes Mensae.

Esta zona se caracteriza en primer lugar por la presencia de un escarpe de unos 2500 metros. La altitud de la zona varía desde unos 100 metros en la parte Sur, en las Tierras Altas de Terra Cimmeria, y los -2400 metros en la zona Norte, en las Tierras Bajas de Utopia Planitia. Esta diferencia de altitud es más o menos constante a lo largo de todo el escarpe en la zona de estudio, excepto en el extremo NW, donde el escarpe es sustituido por un tránsito gradual entre las Tierras Altas y las Tierras Bajas (de Pablo y Pacifici, 2009). Este escarpe tiene una orientación muy definida SE-NW (Figura 1), habiendo sido interpretado por diversos autores como el resultado de una intensa actividad tectónica en la zona (ej., Martín-González et al., 2007; Caprarelli et al., 2007), tal y como revelan los alineamientos morfoestructurales de la zona.

La zona de estudio, también, se caracteriza por la presencia de numerosas mesas, colinas y cerros (Figura 1), que van reduciendo sus dimensiones y altitud hacia el Norte, lo que ha sido interpretado por diferentes autores como el resultado de la erosión y degradación de la zona de la dicotomía por la acción de diversos agentes geológicos, especialmente el agua. De hecho en la zona han sido descritos algunos canales, terrazas fluviales, y deltas (ej., Irwin et al., 2004; Irwin et al., 2005; Tanaka et al., 2005; de Pablo and Pacifici, 2008). Pero también se han descrito edificios volcánicos de diversos tipos (ej., Davis y Tanaka 1995; Skinner y Tanaka, 2007; de Pablo y Pacifici, 2008; Skinner y Mazzini, 2009 de Pablo y Caprarelli, 2010) que han aprovechado las zonas de debilidad tectónica para producir la erosión de los materiales que ha dejado el relieve que se puede observar en la actualidad en las imágenes de satélite y en la topografía (Figura 1).

Desde el punto de vista hídrico, esta zona se caracteriza por ser parte del margen del antiguo océano de Marte que, según diferentes autores pudo cubrir las Tierras Bajas del planeta (ej. Baker et al., 1991; Parker et al., 1993; Fairén et al., 2003). De hecho, recientemente se han descrito en la zona de Nepenthes Mensae, posibles líneas de costa de este océano, que han servido como indicadores de la variación del nivel de las aguas de ese océano (de Pablo y Pacifici, 2008). Pero la zona de Nepenthes Mensae también se caracteriza por la presencia de diversos rasgos fluviales, incluyendo canales de escorrentía o deltas (ej. Irwin et al., 2004, 2005; Tanaka et al., 2005; de Pablo y Pacifici, 2008).

Desde el punto de vista geológico, la zona fue cartografiada como materiales Noéicos (4600-3700 M.a.), asociados a la erosión y degradación de las Tierras Altas en Terra Cimmeria, y a la acción de múltiples agentes geológicos. Los materiales de las Tierras Bajas de Utopia Planitia pertenecen al periodo Hespérico (3700-3100 M.a.). Localmente existen materiales incluidos en las Tierras Altas pertenecientes al periodo Amazónico (3100-0 M.a.) y otros materiales incluidos en las Tierras Bajas que pertenecen al periodo Hespérico superior y Amazónico inferior (3700-1700 M.a) (Greeley y Tanaka, 1986; Tanaka et al., 1992). Esta zona ha sido recientemente cartografiada de nuevo (Tanaka et al., 2005) empleando datos de mayor resolución y criterios cartográficos más parecidos a los aplicados en la cartografía geológica terrestre (ej., Hansen, 2000). En esta nueva cartografía, los materiales de esta región constituyen una unidad geológica (Unidad Nepenthes Mensae), que incluye tanto los materiales que forman las mesetas y colinas de la zona (posiblemente coladas volcánicas y otros materiales estratificados), como los materiales resultantes de su erosión (ej., depósitos de vertientes), así como otros muchos asociados a procesos más recientes (ej., depósitos eólicos). La edad, por tanto, de esta unidad es muy amplia, desde el Noéico inferior para los materiales que forman las mesetas y colinas, hasta la actualidad para los depósitos eólicos localizados en la zona. Los materiales más antiguos estuvieron sometidos a deformación tectónica durante el Noéico Superior y el Hespérico Inferior (Tanaka et al., 2005), tal y como apoyan otros trabajos sobre la actividad tectónica de la zona (ej., Davis y Tanaka, 1995; Caprarelli et al., 2007; Skinner y Tanaka, 2007; Martín-González et al., 2007).

Desde el punto de vista climático, la zona de Nepenthes Mensae, se encuentra localizada en el ecuador, donde las condiciones climáticas, no son tan extremas como a latitudes medias y altas (Carr, 2006), pero sin embargo, algunos autores han mencionado la posible existencia de relieves de origen glacial y periglacial en esta zona ecuatorial de Marte (ej., Page, 2007; Soare et al., 2008; Balme and Gallagher, 2009). El origen de estos rasgos podría encontrarse en el pasado, cuando el clima en las zonas ecuatoriales pudo ser mucho más frío debido a las variaciones climáticas cíclicas que parece haber sufrido el planeta (ej., Laskar et al., 2004). Aún así, las condiciones climáticas son extremadamente frías en la zona, con temperaturas que varían entre los -143 y los 17°C a lo largo del año (Kieffer et al., 1977). Las condiciones de presión atmosférica, por su parte varían entre 6,7 y 9,9 mBar (Hess et al., 1979). Esto hace que la presencia de agua líquida pura en la superficie de esta región en la actualidad sea muy complicada, pero tanto los rasgos geológicos como geomorfológicos indican que el agua ha tenido un cierto papel en el modelado de ésta zona.

3.- Datos y métodos.

En febrero del 2002, la sonda espacial 2001 Mars Odyssey llegó a la órbita de Marte y comenzó a observar el planeta con diversos instrumentos, siendo uno de ellos el Sistema de imágenes de Emisión Térmica (THEMIS) (Christensen et al., 2004). THEMIS es un sensor multiespectral que adquiere información en diferentes bandas del infrarrojo térmico (IR) y también en distintas bandas del espectro visible (VIS), cuya misión es analizar los minerales y las propiedades físicas de la superficie de Marte (Christensen et al., 2004). De forma general, estas imágenes tienen una resolución de entre 100 (THEMIS-IR) y 18 metros por píxel (THEMIS-VIS), siendo estas últimas las que han sido seleccionadas para el estudio de *Nepenthes Mensae* por su relación cobertura-resolución. Existe una cobertura prácticamente total de la zona de *Nepenthes Mensae* (Figura 2), lo que permite un estudio mucho más general que otras imágenes de mayor resolución, como las adquiridas por los sensores MOC, o CTX y HiRISE, de las misiones *Mars Global Surveyor* y *Mars Reconnaissance Orbiter*, respectivamente.

En el desarrollo de este trabajo se han analizado un total de 604 imágenes THEMIS-VIS, con resoluciones de entre 18-34 m/píxel (Figura 2), que han sido analizadas visualmente con el fin de determinar la presencia de distintos tipos de elementos geomorfológicos especialmente de aquellos que indican la presencia de agua (Tabla 1) y en particular aquellos rasgos relacionados con el modelado fluvial, glacial, periglacial, vertientes y litoral, entre otros. Las imágenes THEMIS-VIS han sido obtenidas de los servidores en los que se encuentran a disposición pública de forma gratuita (de Pablo, 2008), como el Sistema de Datos Planetarios (PDS) de la agencia aeroespacial norteamericana NASA (pds.jpl.nasa.gov), o el servidor del propio equipo THEMIS (global-data.mars.asu.edu/bin/themis.pl). Las imágenes usadas han sido las adquiridas por la misión entre Octubre de 2002 y Enero de 2010. Tanto las imágenes como el inventario de las mismas ha sido integrado en un Sistema de Información Geográfica mediante el empleo de un programa de libre distribución y código abierto: Quantum GIS (www.qgis.org/), mediante el que también se han elaborado mapas de distribución de cada uno de los rasgos, especialmente de los relacionadas con la existencia de agua en la zona, y que son discutidos a continuación en este trabajo (Figura 4).

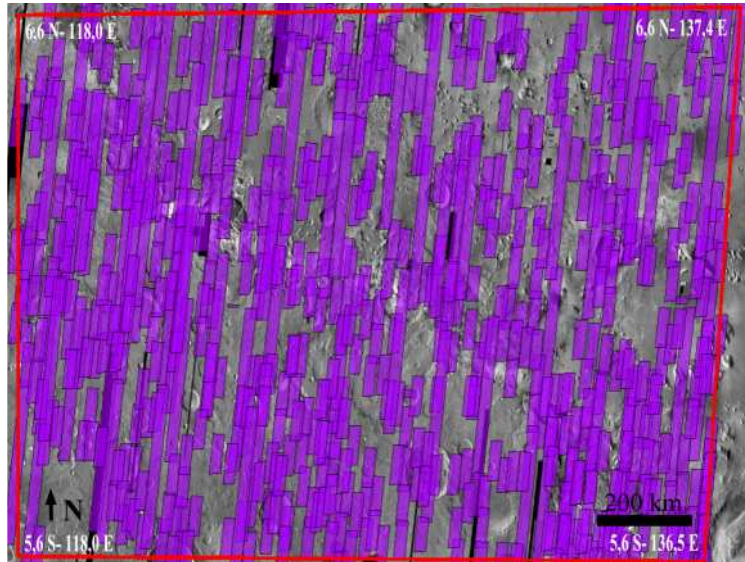


Figura 2: Cobertura espacial de imágenes THEMIS-VIS empleadas en el estudio de la zona de Nepenthes Mensae, Marte.

Por otra parte, para estudios regionales de las observaciones realizadas en las imágenes THEMIS-VIS, se han empleado imágenes THEMIS-IR cuya resolución aproximada es de unos 100 m/píxel, mientras que para los estudios más detallados se han empleado imágenes MOCNA, cuya resolución aproximada es de unos 2 m/píxel. También se ha empleado un modelo digital de elevaciones de la zona de estudio derivado de los datos altimétricos adquiridos por el sensor altímetro láser (MOLA) a bordo de la sonda *Mars Global Surveyor* (<http://ssed.gsfc.nasa.gov/tharsis/spec.html>).

Tipo de modelado	Relieves	Tipo de modelado	Relieves
Fluvial	Canales Canales cabecera remontante Red drenaje dendrítica Sedimentos fluviales Llanuras inundación Terraza fluvial Conos de deyección Abanicos aluviales Deltas Posibles lagunas Meandros	Periglaciario	Pingos Suelos poligonales Termokarst Glaciario de roca Elementos aracniformes
	Glaciario	Valle glaciario Lengua glaciario Terminus Circo glaciario Terreno estriado Morrenas Drumlin Eskers Aristas	Vertientes
Litoral			Líneas de costa
Eólico			Dunas
Volcánico			Colada Lava Volcán
Tectónico			Crestas
Impactos			Cráter de Impacto grande Impacto de eyecta con flujo

Tabla 1: Listado de relieves buscados en el estudio de *Nepenthes Mensae*, clasificados según el tipo de modelado. Fuente: elaboración propia

4. Resultados

El análisis de las imágenes ha permitido reconocer en la región un elevado número de rasgos relacionados con la existencia de agua en la zona. En particular, son muy abundantes los relacionados con la actividad fluvial, cuya distribución y tipología indica una compleja actividad hídrica. Los rasgos geomorfológicos de este tipo más abundantes en la zona de estudio son: canales, llanuras de inundación, meandros, terrazas fluviales, conos de deyección, abanicos aluviales, deltas, y posibles zonas que actuaron como lagunas. A continuación se describen brevemente:

Los canales de la zona son muy heterogéneos en cuanto a longitud y morfología, y comprenden un rango de longitudes desde 85 km hasta menos de 1 km, variando mucho su grado de erosión. Su distribución geográfica es amplia, apareciendo en mayor número en las Tierras Altas y próximo a la dicotomía entre las Tierras Altas y las Tierras Bajas, aunque también aparecen canales asociados a cráteres de impacto en las Tierras Bajas. Es bastante común encontrar canales poco encajados donde no se aprecia una continuidad clara a lo largo de su recorrido.

Otras veces se aprecian canales siguiendo el trazado de posibles fallas y alineamientos morfoestructurales descritos en la zona (ej., Martín-González et al., 2007; Caprarelli et al., 2007). Sin embargo, la mayoría de los canales tienen su cabecera en las Tierras Altas de Terra Cimmeria y desembocan en el límite entre las Tierras Altas y las Tierras Bajas (ej., Carr, 1996, 2006; Irwin et al., 2005; de Pablo y Pacifici, 2008; Valenciano et al., 2009).

En algunos casos los canales van a parar a depresiones y cráteres donde, posiblemente, se formaron pequeños lagos, siendo esto ampliamente discutido en la bibliografía para otras zonas de Marte (ej., Cabrol y Grin, 1999; Cabrol y Grin, 2001). Los posibles paleolagos observados en este trabajo en la región de Nepenthes Mensae, (Figura 3a) incluyen morfologías de los tres tipos descritos por Cabrol y Grin (1999): lagos formando sistemas cerrados, lagos en sistemas abiertos, y cadenas de lagos.

Un gran número de los canales se caracterizan por encontrarse en valles estrechos, poco profundos y no se llegan a desarrollar patrones dendríticos o, de hacerlo, se encuentran poco desarrollados. No obstante a veces se encuentran excavando valles más encajados. A su vez hemos observado que los canales llevan elementos geomorfológicos asociados a ellos, y que aparecen de forma análoga en la Tierra. Nos referimos a meandros, terrazas fluviales y zonas que hemos interpretado como posibles llanuras de inundación, teniendo una distribución espacial mayoritaria en las Tierras Altas, estando presentes en algunas zonas de las Tierras Bajas.

Asimismo se pueden observar canales cuya cabecera parece estar erosionándose o canales con cabecera remontante. Aparecen asociados tanto a la dicotomía como a las Tierras Altas, permaneciendo ausentes en las Tierras Bajas. Dentro de este tipo de canales hemos observado que algunos de ellos desembocan en posibles zonas de inundación antiguas o en otros canales. Muchos de ellos se están asociados a deltas y conos de deyección (Figura 3b).

Localmente se han observado redes dendríticas, con un canal principal que recibiría el aporte hídrico de canales subordinados con hasta cinco niveles de afluentes. El rango de longitud varía desde 3 hasta 24 km. (Figura 3c). Estos canales dendríticos se encuentran distribuidos al Oeste y Sureste de las Tierras Altas de la zona de estudio, así como en las Tierras Bajas.

Otros rasgos geomorfológicos analizados han sido los conos de deyección, los abanicos aluviales y los deltas. En Nepenthes Mensae aparecen conos de deyección pequeños entre 300 m y 95 m de anchura al pie de taludes, y en las laderas en la pared interna de cráteres de impacto, mostrando una distribución homogénea en toda el área de estudio. En ocasiones se observan claramente todos los elementos morfológicos que constituyen los conos de deyección y los abanicos aluviales, apareciendo la cuenca de recepción, el canal de desagüe y el cono de deyección o abanico aluvial propiamente dicho (Figura 3a). También hemos observado conos de deyección más grandes, asociados a canales que alcanzan entre 0,6 y 5 km de anchura a los que hemos denominamos abanicos aluviales, apareciendo solo en las Tierras Bajas.

En función de las distintas clasificaciones que existen en la bibliografía (ej., Cabrol y Grin, 2001; Kraal et al., 2008; de Villiers et al., 2009a, 2009b; Kleinhans, 2009a, 2009b) sobre los deltas y abanicos aluviales en Marte, en la zona de estudio existen abanicos aluviales, deltas alargados, deltas escalonados, deltas suaves (que incluyen a los deltas tipo Gilbert) y deltas ramificados (Figura 3 a, b, d, e). Además, tanto en deltas suaves como alargados hemos determinado la presencia de canales que erosionan el interior del delta, (Figura 3e) lo que tiene grandes implicaciones climáticas como veremos más adelante, ya que es indicador de la existencia de diversos episodios de actividad fluvial en la zona. Los deltas se encuentran distribuidos en la dicotomía, a excepción de un delta de tipo escalonado que aparece al Sur, en un cráter de impacto las Tierras Altas (Figura 3b).

Por otro lado también existen barrancos, cárcavas y torrenteras en las laderas de mesetas, colinas y paredes de los cráteres de impacto. Su distribución es muy homogénea en toda la zona de estudio, aunque aparecen en mayor proporción en las Tierras Altas. Igualmente en algunas imágenes se observan una serie de deslizamientos en las pendientes y en glaciares que poseen una morfología lobulada y se podrían interpretar como coladas de barro, apareciendo mayoritariamente a lo largo de la dicotomía y en las Tierras Bajas asociado a cráteres de impacto y zonas con influencia de modelado glaciar y periglacial.

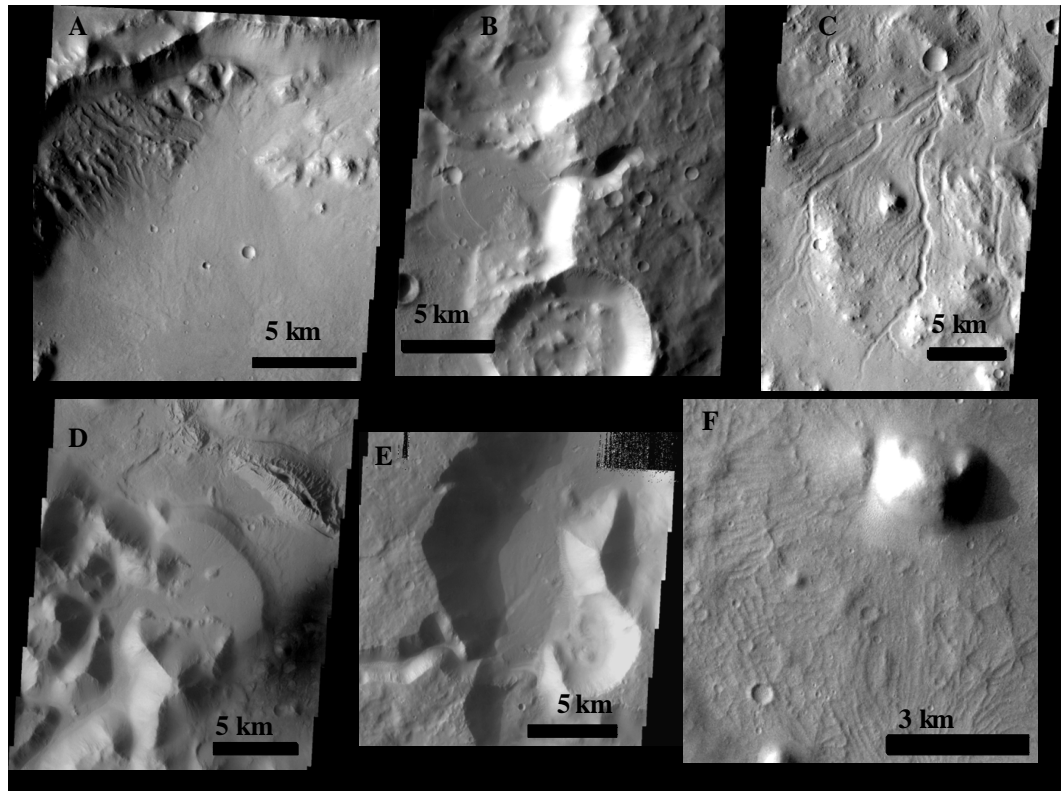
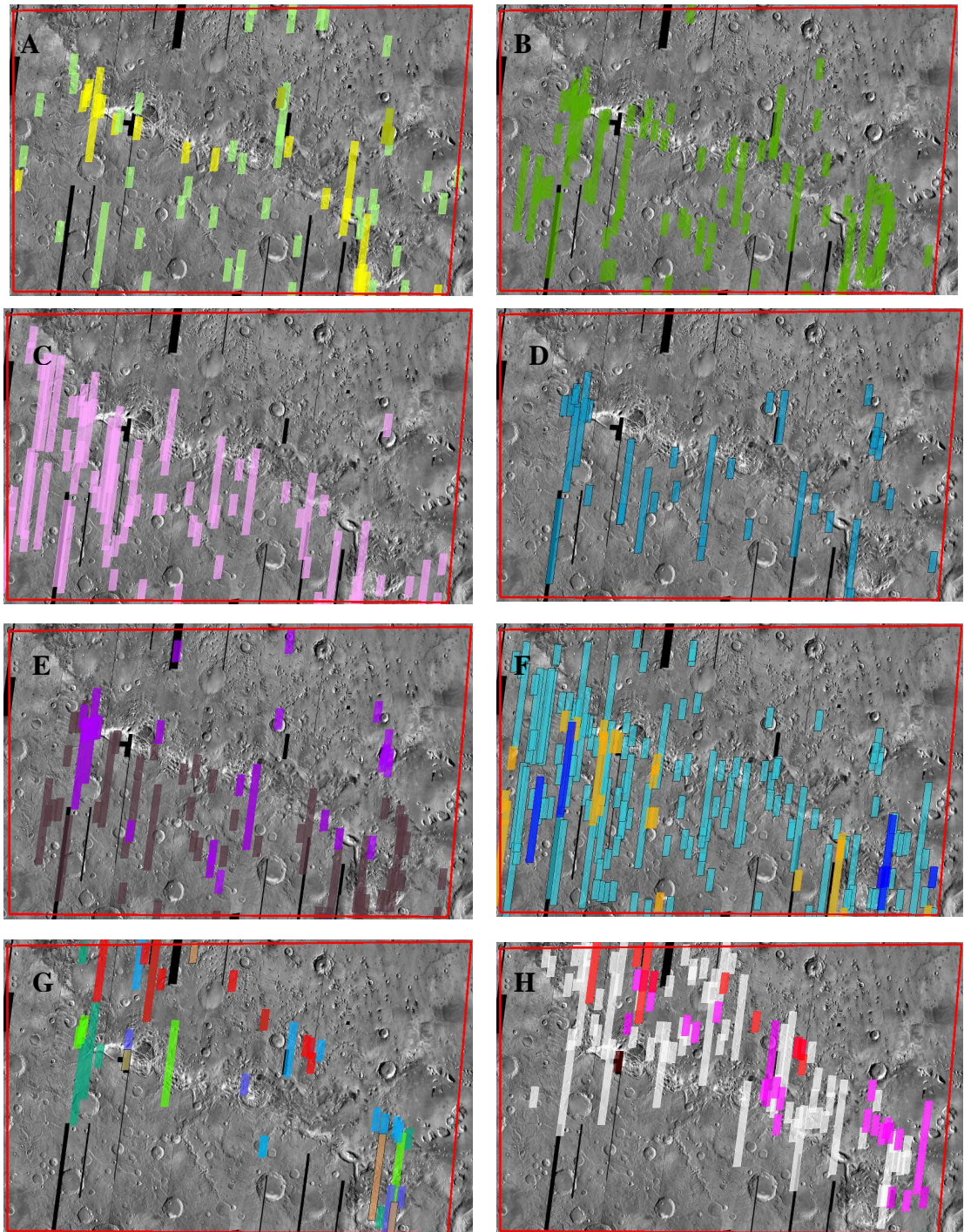
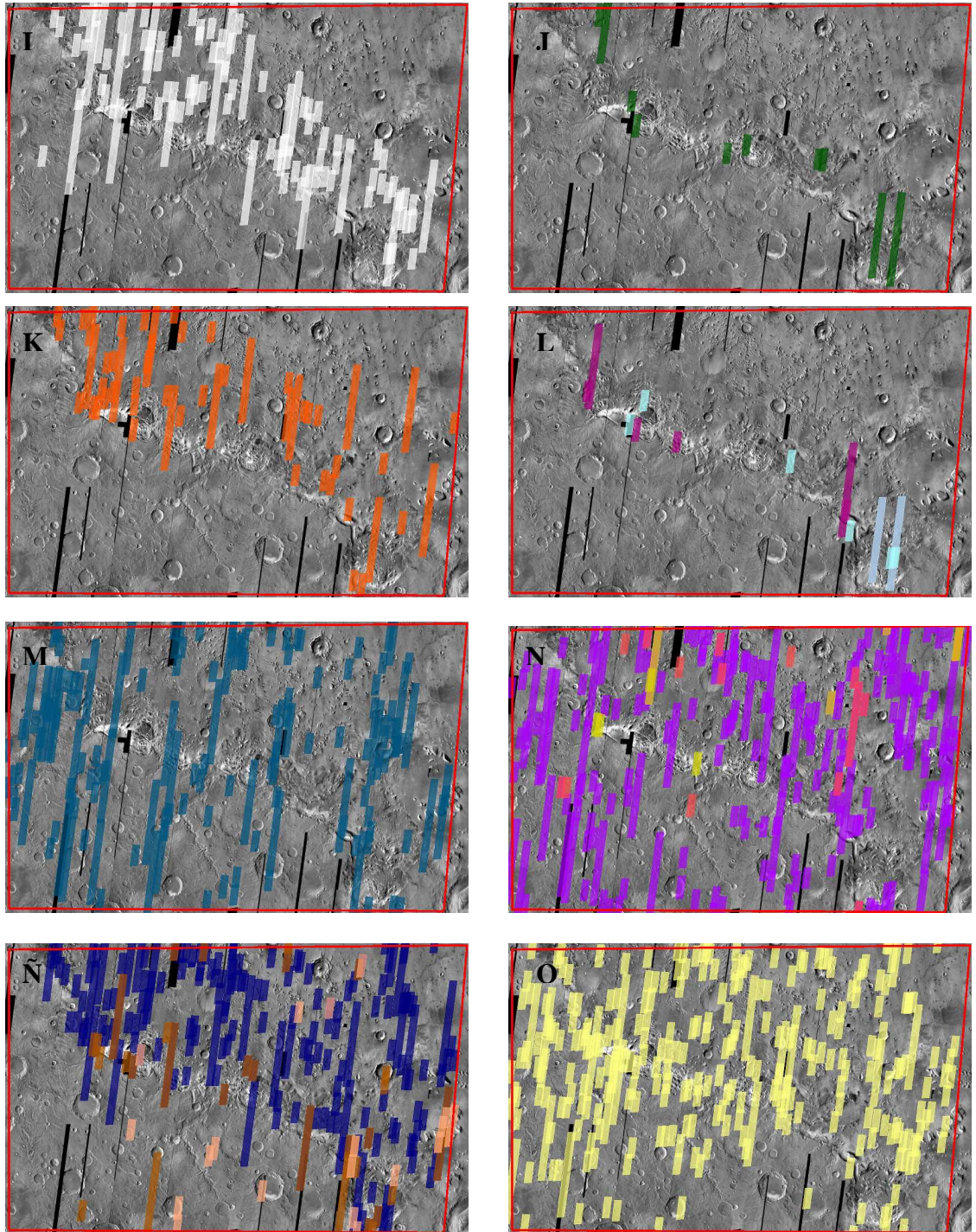
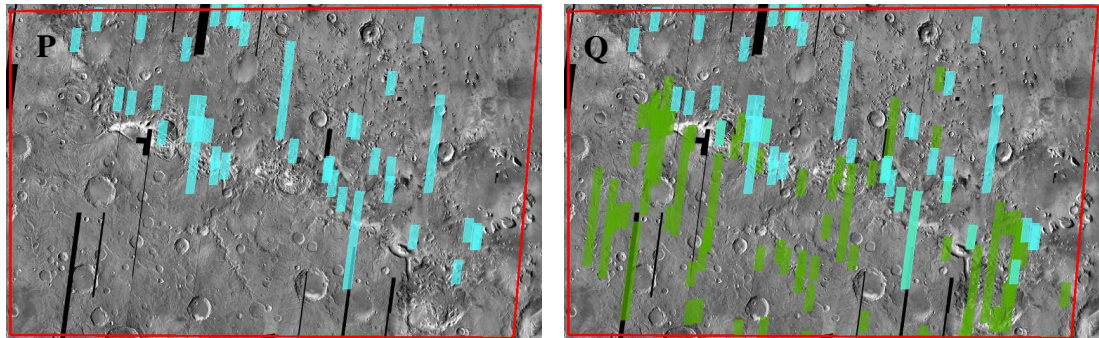


Figura 3: Ejemplo de los elementos geomorfológicos presentes en la zona de estudio: A. Abanico aluvial (V18168015); B. Delta escalonado con canal de erosión remontante asociado (V27604001); C. Red dendrítica (V26942001); D. Delta suave tipo Gilbert y volcán fisural (V09832020); E. Delta alargado con un canal erosionando el interior del delta (V27266033); y F. Elementos aracniformes (V27690031). Fuente: elaboración propia

También se ha observado que existen numerosas terrazas a lo largo del área de estudio, incluyendo algunas de las interpretadas por otros autores en esta zona como posibles líneas de costa (1) por estar asociadas, no a canales, sino a depresiones más o menos extensas, (2) por tener una altura común a lo largo de las distintas áreas donde aparecen (ej., de Pablo y Pacifici, 2008). Además, estas posibles líneas de costa se encuentran distribuidas sólo en las Tierras Bajas, mientras que las terrazas fluviales están mayoritariamente en las Tierras Altas, y asociadas a canales o el interior de cráteres de impacto. Todo esto apoya la hipótesis de que estos relieves similares a terrazas asociados a depresiones en las Tierras Bajas se han formado por sedimentación en el margen de una lámina de agua, de un lago o del antiguo océano de Marte (ej., Baker et al., 1991; Parker et al., 1993; Fairén et al., 2003, entre otros).







Leyenda:

	Conos de deyección		Circo glaciar		Terminus
	Deltas		Drumlin		Valle glaciar
	Abanicos aluviales		Esker		Cráter eyecta lobulada
	Terrazas fluviales		Aristas		Crestas
	Meandros		Suelos poligonales		Volcanes
	Posibles paleolagos		Terrenos arcniformes		Coladas de lava
	Sedimentos fluviales		Terrenos estriados		Deslizamientos
	Llanuras de inundación		Termokarst		Inselberg
	Canales		Glaciar rocoso		Cárcavas
	Redes dendríticas		Lengua glaciar		Dunas
	Canales cabecera remontante		Pingos		Líneas de costa

Figura 4: Distribución espacial de los elementos geomorfológicos en Nepenthes Mensae. A. Abanicos aluviales, deltas y conos de deyección.; B. Terrazas fluviales.; C. Meandros.; D. Posibles antiguas lagunas.; E. Sedimentos fluviales y llanuras de inundación.; F. Canales, redes dendríticas y canales de cabecera remontante.; G. Circo glaciar, drumlin, eskers, aristas, suelos poligonales y terrenos arcniformes.; H. Estriación típica, terreno arcniforme y termokarst.; I. Terrenos estriados.; J. Lengua glaciar.; K. Pingos.; L. Terminus y valle glaciar.; M. Cráter eyecta lobulada.; N. Crestas, colada de lava y volcanes.; Ñ. Deslizamientos, inselberg y cárcavas.; O. Dunas.; P. Líneas de costa.; Q. Líneas de costa y terrazas fluviales. Fuente: elaboración propia

Otros rasgos relacionados con la existencia de agua en Nepenthes Mensae son los elementos geomorfológicos pertenecientes al modelado glaciar y periglaciar (Tabla 1), siendo los más importantes terminus, circos glaciares, terreno estriado, elementos aracniformes, suelos poligonales, drumlin, eskers, pingos, y termokarst.

Hemos interpretado la presencia de valles glaciares y de lenguas glaciares como grandes valles amplios con marcas de abrasión. A veces se observa el flujo de lo que pudo ser un antiguo glaciar. Aunque no es muy común también hemos interpretado en algunas imágenes la presencia del pie del glaciar o “terminus”. Tanto los valles glaciares, lenguas glaciares y terminus se encuentran en las Tierras Bajas, junto a la dicotomía. Asimismo hemos observado posibles circos glaciares en torno a la dicotomía y en las Tierras Bajas. Su morfología en anfiteatro es análoga a los que encontramos en la Tierra. En su interior generalmente se aprecia unos sedimentos con marcas de flujo a favor de la pendiente y en su parte baja se aprecian unos escarpes que podrían pertenecer a los terminus de un glaciar (Figura 3e).

En algunas imágenes de la zona se han podido distinguir rasgos que hemos interpretado como drumlins y eskers por su parecido con los de la Tierra. En ambos casos aparecen en las Tierras Bajas, junto a la dicotomía. Los drumlin además aparecen siempre agrupados y alineados.

Los termokarst han sido descritos en distintas zonas de Marte (ej: Costard y Kargel, 1995; Costard y Baker, 2001; Soare et al., 2007, 2008), y en la zona de estudio aparecen únicamente en las Tierras Bajas, a lo largo de una franja paralela a la dicotomía en dirección NO-SE. Su distribución espacial coincide con la del terreno estriado, aunque aparece en menor número. Se encuentra formado por depresiones poco profundas en el terreno, de bordes lobulados, en áreas de baja pendiente que poseen un modelado glaciar, periglaciar. Ocasionalmente se encuentran relacionados con canales.

Existen terreno estriados y terrenos aracniformes, dos morfologías de especial interés en el estudio de los procesos periglaciares de la región. Por un lado, hemos denominado terreno estriado a la superficie de aspecto ondulado formado por la presencia de surcos métricos a decimétricos. Muchos de éstos muestran una distribución paralela entre sí, mientras que en otros casos siguen una distribución radial a pequeños cerros, montículos y lomas del terreno. En ambos casos se localizan en las Tierras Bajas a lo largo de una franja bastante amplia paralela a la dicotomía en dirección NO-SE. Por otro lado, se han observado que algunos terrenos aparentemente estriados radiales a pequeñas lomas presentan un aspecto claramente distinto y aparecen de forma aislada. Estos rasgos tienen un aspecto similar a unas morfologías denominadas terrenos aracniformes que se han observado, mediante imágenes de alta resolución MOC y HiRISE en algunas zonas del Polo Sur y Polo Norte bajo la capa de hielo estacional (Piqueux et al., 2003; Hansen et al., 2010a, 2010b; Thomas et al., 2010). Aunque muy parecidos, los terrenos aracniformes observados en Nepenthes Mensae son más grandes (0,8-2,2 km de longitud) que los descritos en la zona polar con un núcleo de entre 0,3-0,9 km diámetro (Figura 3f). Aunque la morfología es similar, sería necesario estudiar en detalle si ambos comparten el

mismo origen o si en este caso, los terrenos de aspecto aracniforme en Nepenthes Mensae están únicamente asociados a procesos periglaciares.

Debido a la resolución de las imágenes analizadas, apenas se han podido identificar suelos o terrenos poligonales, indicadores de procesos periglaciares y de la presencia de agua en el subsuelo. Los observados en la zona de estudio presentan patrones muy irregulares, sin morfologías de polígonos regulares claros, y con un relieve positivo sobre el terreno circundante. Se localizan en las Tierras Bajas, especialmente asociadas a áreas planas y depresiones, en zonas donde la superficie parece estar constituida por materiales finos a la vista de su textura. Relacionado con los procesos periglaciares, en la zona también se ha localizado un posible glaciar de roca situado en la dicotomía. Todos estos rasgos podrían indicar la existencia de procesos periglaciares en la zona, aunque con un escaso papel en el modelado general de la región de Nepenthes Mensae.

Además de todos estos rasgos, hemos estudiado la distribución de cráteres de impacto con un diámetro medio entre 3,5- 15 km con presencia de depósitos de eyecta lobulados, generalmente interpretados como debidos a la presencia de agua (líquida o helada) en el subsuelo en el momento del impacto. Éste tipo de cráteres presentan una distribución muy homogénea, tanto en las Tierras Altas como en las Tierras Bajas.

Existen otros elementos geomorfológicos analizados en la zona que no tienen relación directa con el agua pero que han sido estudiados para conocer mejor la historia geológica y climática de Nepenthes Mensae. Dichos rasgos han sido glaciares, dunas, crestas, volcanes y las coladas de lava. Tanto glaciares como dunas poseen una distribución muy homogénea en la zona de estudio. Los volcanes aparecen en torno a la dicotomía y en las Tierras Bajas, mientras que las coladas de lava se reconocen tanto en las Tierras Altas y como en las Tierras Bajas. Además la presencia de crestas de origen tectónico es muy patente en todo Nepenthes Mensae.

Todos estos rasgos geomorfológicos aportan una gran información sobre el importante papel que el agua ha tenido en la evolución del paisaje de esta región de Marte, tal y como se discute, en algunos aspectos, a continuación.

5.- Discusión

Como se ha visto, son numerosos los rasgos geomorfológicos existentes en la región de Nepenthes Mensae de Marte que se han formado por la participación (de forma más o menos exclusiva) del agua (ya sea en estado sólido como líquido). Sin embargo, cabe destacar que existen dos grupos fundamentales de modelados (en cuanto a la discusión que nos ocupa): aquellos relacionados con la presencia de agua en estado líquido, y al agua en estado sólido. Esta sencilla clasificación ya permite establecer una discusión interesante, pues se trata por tanto de modelados del paisaje asociados a procesos fluviales (con mayor o menor aporte por parte del

agua subterránea), y a procesos glaciares y periglaciares, respectivamente, en la misma región del planeta.

Debido a la uniformidad del relieve a lo largo de toda la región de Nepenthes Mensae, y a pesar del importante desnivel topográfico de casi 3000 metros entre las Tierras Altas de Terra Cimmeria al Sur, y las Tierras Bajas de Utopia Planitia al Norte, no debe existir una gran variabilidad climática en dicha zona a lo largo del espacio, tal y como puede deducirse del estudio de modelos climáticos contenidos en la base de datos climáticos de Marte (Forget et al., 1999). Esto lleva a suponer que las condiciones climáticas regionales han debido de cambiar a lo largo del tiempo. Esta idea apoya las hipótesis presentadas por diferentes autores según las cuales el clima de Marte ha sufrido importantes cambios a lo largo de su historia geológica, asociado a procesos volcánicos (ej., Baker et al., 1991) o a procesos orbitales (ej., Laskar et al., 2004). Sea de una u otra forma, los rasgos fluviales y glaciares existentes en Nepenthes Mensae implican la variación entre un clima frío y un clima cálido, en ambos casos con una importante cantidad de agua disponible, apoyando la idea de los modelos de un Marte cálido y húmedo (ej., Kargel, 2004) y un Marte frío y húmedo (Fairén, 2010). Ambas condiciones están apoyadas por los rasgos geomorfológicos observados en la zona: canales y glaciares, según distintos autores (ej., de Pablo y Pacifici, 2008; de Pablo y Caprarelli, 2010, respectivamente, entre otros).

Centrándonos en el modelado fluvial, la presencia de canales es claro indicador de la existencia de un periodo en el que el agua líquida fluyó en la superficie. A la vista de algunos modelados fluviales como meandros y terrazas, esta actividad fluvial no ocurrió de forma puntual, sino que debió de tener una actividad relativamente prolongada en el tiempo, facilitando la excavación de meandros y el encajamiento del propio canal por ajustes en su perfil de equilibrio. Además, la duración de la actividad fluvial en esta región tuvo que ser lo suficientemente prolongada como para dar lugar a la formación de redes dendríticas como las observadas en distintos puntos de las Tierras Altas en la zona de estudio (Figura 4).

La presencia de deltas y abanicos aluviales en distintos puntos de la zona de estudio (Figura 4) también apoya la hipótesis de una actividad fluvial relativamente prolongada en el tiempo, así como la presencia de una lámina de agua en la región de las Tierras Bajas (el posible océano boreal –Baker et al., 1991; Fairén et al., 2003 y referencias citadas-, o una pequeña parte de él a modo de mar interior –de Pablo y Pacifici, 2008, 2009), para la cual algunos autores han propuesto la existencia de cambios de nivel a lo largo del tiempo (de Pablo y Pacifici, 2008). La presencia de pequeños canales excavando los depósitos deltaicos que hemos observado en algunas imágenes de la zona (ej., V27266033, V27878002, V17907002) también son indicativos de (A) un descenso en el nivel de la lámina de agua en la zona durante el periodo en el que es estable el agua líquida en la superficie, o (B) la presencia de ciclos de actividad fluvial en la zona y, por tanto variaciones en la estabilidad del agua líquida en la superficie de Marte.

Pero los canales no sólo informan de la presencia de agua superficial, sino que también aportan pistas sobre la existencia de agua subterránea. Éste es el caso de los canales con cabecera

remontante y generalmente semicircular. En la Tierra, existen dos explicaciones para este tipo de canales. Por un lado estaría relacionado con la erosión en la cabecera por la presencia de materiales poco consolidados y/o ajustes en el nivel de base del canal en el primer caso, y con el colapso superficial debido a la circulación de agua subterránea, formando procesos de “piping”, en el segundo. Éste último podría ser el origen de muchos de los canales observados en la zona de estudio, muy similares a los que en la Tierra se forman en regiones áridas, siendo un ejemplo las Bardenas Reales Navarra, España (Desir et al, 2009). En la Tierra, el desarrollo del piping va normalmente ligado a la presencia de materiales finos no consolidados (arcillas, limos y arenas) con altos contenidos en sales y arcillas que pueden ser fácilmente evacuados favoreciendo la dispersión del material y el agrietamiento superficial del suelo (López Bermúdez, 1986). Aunque los procesos de piping se dan en muchas regiones con climas distintos, alcanzan un mayor desarrollo en los climas semiáridos (Parker, 1963; Jones, 1981). Los factores que intervienen en función de su desarrollo inicial en regiones semiáridas, según López Bermúdez (1986), son: (1) condiciones climáticas semiáridas con lluvias esporádicas e intensas provenientes de tormentas que alimentan rápidamente los conductos y evacúan el material; (2) amplios periodos sin lluvias que des sequen y agrieten los materiales húmedos; (3) una textura y estructura del suelo que permita la pérdida de cohesión, dispersión y perforación, es decir suelos con altos contenidos en arcillas y limos; (4) suelos con alto contenido en sales solubles que permitan una capacidad de cambio de base elevada especialmente el sodio, ya que el lavado del sodio acarrea la dispersión del material y el transporte, y por último (5) las pendientes y orientación de las laderas que facilitan la formación del piping.

La evolución de la cabecera en estos canales de Marte, suponiendo que se formaran en condiciones de clima árido o semiárido sería el siguiente: (1) procesos de incisión y expansión lateral debido a la erosión y posterior colapso de los conductos de piping, (2) formación de procesos de ladera como vuelcos y caídas de bloques, y (3) lavado y transporte del sedimento (Desir y Marín, 2009) (Figura 5).



Figura 5: A) Posible zona con procesos de piping en la región de Nepenthes Mensae (V27478029), B) análogo terrestre de dicho modelado en la región de las Bárdenas Reales (Navarra, España), torrentera antrópica que evoluciona por vuelcos y procesos de piping, C) Torrenteras en Bárdenas Reales (Navarra, España), D) Detalle interior piping Imágenes (A) THEMIS/JPL/NASA. (B, C y D) de Desir y Marin, 2009. Fuente: elaboración propia

Pero este tipo de relieves no es el único indicador de la existencia de agua en el subsuelo (líquida o congelada). Las torrenteras observadas en numerosos puntos de la zona de estudio son similares a las descritas hace algunos años gracias a las imágenes MOC de alta resolución (Malin and Edgett, 2000). Desde entonces, su origen se ha relacionado con la fusión del agua que cementa algunos de los materiales finos más superficiales debido a la radiación solar (Malin and Edgett, 2000). Sin embargo, existen muchos otros estudios que muestran la distribución de estos rasgos por todo el planeta (ej: Mellon and Phillips, 2001; Heldmann et al., 2007; Kneissl et al., 2010) y que lo relacionan con la existencia de acuíferos en Marte (ej., Márquez et al., 2005). En la zona de estudio se han observado un alto número de estos rasgos, aunque sería necesario un estudio detallado con el fin de poder interpretar un origen claro de los mismos. En cualquier caso, su presencia revela la existencia de ciertas cantidades de agua en el subsuelo más o menos superficial.

Por otro lado, en ausencia de una lámina de agua, cuando se produce un impacto, se pueden llegar a formar depósitos de eyecta muy característicos entorno a los cráteres, con morfología lobuladas similares a los flujos de barro (ej., Melosh, 1989; Carr, 1996, 2006). En realidad este tipo de eyectas, cuando se producen, son el resultado de flujos de barro formados por (1) el

desplazamiento del agua junto con el resto de materiales eyectados como consecuencia del impacto, formando una masa de barro alrededor del cráter, o (2) la fusión del hielo subsuperficial (permafrost húmedo) como consecuencia de las altas temperaturas que se alcanzan por el impacto, con similares consecuencias que en el caso anterior.

Respecto a los rasgos glaciares y periglaciares, en la zona de estudio también se pueden observar numerosos de ellos, especialmente en una franja paralela a la dicotomía entre las Tierras Altas y las Tierras Bajas (Figura 4) que, según algunos autores, funcionó como una península cuando el nivel del mar descendió hasta -1700 m (de Pablo y Pacifici, 2009). En dicha zona se han observado numerosos elementos geomorfológicos tales como estriaciones, terrenos arcniformes, termokarst, pingos, drumlin, y eskers. Para su formación es necesario un episodio de clima frío que, dada la latitud de la zona, debió estar asociado a un importante cambio climático (relacionado con procesos atmosféricos, u orbitales). El modelado periglacial, por su parte, informa de condiciones climáticas frías, pero también de una variabilidad (al menos desde el punto de vista térmico) que favorece los procesos de congelación y descongelación en el terreno. Esto es importante para establecer que, en cierta medida, se dieron condiciones para la existencia de agua líquida en esta región del planeta, a pesar de la existencia de unas condiciones climáticas frías.

Desde un punto de vista astrobiológico, la zona de Nepenthes Mensae podría ser una buena candidata para buscar indicios de vida (tal y como se conoce en la Tierra). Los distintos rasgos estudiados apuntan a la existencia de agua líquida, así como sedimentos que, de alguna manera podrían permitir la conservación de la materia orgánica, al igual que se ha propuesto para la región de Meridiani Planum (Squyres and Knoll, 2005), convirtiéndose esta zona de Marte en un firme candidato para la exploración astrobiológica de Marte. Y aunque las condiciones son y pudieron ser extremas, con agua de alta salinidad, alta concentración de hierro, alta acidez y temperaturas frías (Fairén, 2010), en estas mismas condiciones se han encontrado formas de vida en la Tierra, así que ¿por qué no en Marte?

Finalmente, y a la vista de los resultados obtenidos en nuestro estudio regional, es necesario realizar un estudio detallado de los distintos rasgos reconocidos, con el objetivo de conocer en profundidad cada uno de ellos y establecer de forma clara relaciones temporales y espaciales entre unos y otros que ayuden a discernir entre los distintos episodios en los que el agua (líquida y/o congelada) fue el principal agente del modelado del paisaje de la región de Nepenthes Mensae de Marte. Para llevar a cabo ese trabajo será necesario, partiendo del análisis general realizado de cada una de las imágenes THEMIS-VIS disponibles hasta la actualidad de dicha región, seleccionar rasgos y/o áreas de interés y analizar las imágenes de mayor resolución disponibles. Para ello será necesario emplear las imágenes adquiridas por los instrumentos HiRISE (35 cm/píxel), MOC-NA (2 m/píxel) y CTX (6 m/píxel), y combinar dichas imágenes con datos altimétricos adquiridos por el sensor MOLA (463 m/píxel), y con los modelos digitales de elevación derivados de los datos HRSC (50 m/píxel) y HiRISE (1 m/píxel). Todo

ello será posible gracias al uso de programas informáticos dedicados al procesado de datos planetarios (ISIS), y a los Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS y QuantumGIS).

6.- Conclusiones

En la región de Nepenthes Mensae, Marte, el agua ha tenido un papel fundamental en el desarrollo de las formas del relieve que actualmente se pueden observar en las imágenes THEMIS-VIS (18 m/píxel). En la gran mayoría de las imágenes se pueden observar distintos rasgos que de una forma u otra se encuentran relacionados con la presencia de agua. Estos rasgos, además, revelan la presencia de agua tanto en estado sólido como líquido, lo que sin duda lleva a establecer la existencia de, al menos, un episodio recambio de las condiciones climáticas reinantes en la zona, dado que las características del relieve, topográficas y latitudinales no permiten a priori grandes variaciones climáticas de un punto a otro de la zona de estudio. Esto además conlleva importantes implicaciones para el planeta, ya que, junto con las observaciones de otros trabajos, permite interpretar la existencia de condiciones glaciares y climáticamente muy frías en la región ecuatorial del planeta.

Por otro lado, los rasgos geomorfológicos relacionados con el agua que se han observado en la zona permiten deducir la presencia de agua subterránea, lo que sin duda es una característica que empuja a los científicos a continuar con la búsqueda de vida en Marte ya que ofrece multitud de nichos y oportunidades para una posible vida marciana que pudiera estar bajo la superficie en estado de latencia o viva.

7.-Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen al equipo del sensor THEMIS/ASU/JPL/NASA el uso de las imágenes empleadas en este trabajo. También agradecen el uso de otros de los datos empleados: MOC y MOLA a MSSS y JPL/NASA. Este trabajo ha sido parcialmente desarrollado gracias a una Beca de Colaboración en el Departamento de Geología de la Universidad de Alcalá, concedida por Ministerio de Educación a Alberto Valenciano Vaquero.

8.-Bibliografía

- ASH, R.L, (2008) Phoenix Lander Implications on in situ resource utilization for robotic exploration of Mars. *Leag-Iceum-Srr Cape Canaveral*, FL.
- BAKER, V.L (2006) Geomorphological evidence for water on Mars. *Elements*, 2(3) 139-143.
- BAKER, V.R.; STROM, R.G.; GULICK, V.C.; KARGEL, J.S.; KOMATSU, G and KALE, V.S. (1991) Ancient oceans, ice sheets and hydrological cycle on Mars. *Nature*, 352. 589-594.
- BALME, M.R. and GALLAGHER, C. (2009). An equatorial periglacial landscape on Mars. *Earth and Planetary science Letters*, 285. 1-15.

- BELL, J. (2007) Agua en Marte. *Investigación y ciencia*, 365. 7-13.
- BIBRING, J.P.; LANGEVIN, Y.; GENDRIN, A.; GONDET, B.; POULET, F.; BERTHÉ, M.; SOUFFLOT, A.; ARVIDSON, R.; MANGOLD, N.; MUSTARD, J.; DROSSART, P. and THE OMEGA TEAM (2005) Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/Mars Express observations. *Science*, 307. 1576–1581. doi: 10.1126/science.1108806.
- CABROL, N.A. and GRIN, E.A. (1999) Distribution, classification, and ages of Martian impact crater lakes. *Icarus*, 142. 160–172.
- CABROL, N.A. and GRIN, E.A. (2001) The evolution of lacustrine environments on Mars: Is Mars only hydrologically dormant? *Icarus*, 149. 291–328.
- CAPRARELLI, G.; PONDRELLI, M.; DI LORENZO, S.; MARINANGELI, L.; ORI, G.G.; GREELEY, R. and NEUKUM, G. (2007). A description of surface features in north Tyrrhena Terra, Mars: Evidence for extension and lava flooding. *Icarus*, 191. 524–544.
- CARR, M.H (1996) Water on Mars. *Oxford University Press*, New York. 229 pp.
- CARR, M.H (2003) Oceans on Mars: An assessment of the observational evidence and possible fate. *Journal of Geophysical Research*, 108. doi:10.1029/2002JE001963.
- CARR, M.H. (2006) The surface of Mars. *Cambridge University Press*, London. 307 pp.
- CHRISTENSEN, P.R (2005) Estratigrafía y relieve de Marte. *Investigación y ciencia*, 348. 6-13.
- CHRISTENSEN, P.R.; RUFF, S.W.; FERGASON, R.; GORELICK, N.; JAKOSKY, B.M.; LANE, M.D.; MCEWEN, A.S.; MCSWEEN, H.Y.; MEHALL, G.L.; MILAME, K.; MOERSCH, J.E.; PELKEY, S.M.; ROGERS, A.D. and WYATT, M.B. (2005) Mars Exploration Rover candidate landing sites as viewed by THEMIS. *Icarus*, 176. 12–43.
- CHRISTENSEN, P.R.; JAKOSKY, B.; KIEFFER, H.H.; MALIN, M. C.; MCSWEEN, H. Y.; NEALSON, K.; MEHALL, G. L.; SILVERMAN, S. H.; FERRY, S.; CAPLINGER, M. and RAVINE, M. (2004) The Thermal Emission Imaging System (THEMIS) for the Mars 2001 Odyssey Mission. *Space Science Review*, 110. 85–130.
- COSTARD, F. and BAKER, V.R. (2001) Thermokarst landforms and processes in Ares Vallis, Mars. *Geomorphology*, 37.289-301.
- COSTARD, F. and KARGEL, J.S. (1995) Outwash plains and thermokarst on Mars. *Icarus*, 114. 93-112.
- DAVIS, P.A. and TANAKA, K.L. (1995). Topography of closed depressions, scarps, and grabens in the North Tharsis region of Mars: Implications for shallow crustal discontinuities and graben formation. *Icarus*, 114. 403-422.
- DE PABLO, M.A. (2008) Recursos y Fuentes de datos para la creación de un laboratorio de Geología Planetaria. *Tecnología y desarrollo*, 6. 1-26.
- DE PABLO, M. A. and PACIFICI, A (2008) Geomorphological evidence of water level changes in Nephentes Mensae, Mars. *Icarus*, 196. 667-671.
- DE PABLO, M. A. and PACIFICI, A (2009) Chain of depressions and the watershed evolution in Nephentes Mensae, Mars. *Lunar and Planetary Science Conference*, 40th. Abstract #1095.

- DE PABLO, M.A. and CAPRARELLI, G. (2010) Possible subglacial volcanoes in Nepenthes Mensae, eastern hemisphere, Mars. *Lunar and Planetary Science Conference*, 41st. Abstract #1584.
- DE PABLO, M.A. and KOMATSU, G. (2008). Possible pingo fields in the Utopia basin, Mars: Geological and climatical implications. *Icarus*, 199. 49-74.
- DE PABLO, M.A. and PACIFICI, A. (2007) Geomorphological evidences of cryoturbation on Nepenthes Mensae, Mars. *Geophysical Research Abstracts*, 9. 01765.
- DE VILLIERS, G.; KLEINHANS, M; POSTMA, G.; HAUBER, E.; DE JONG, S. and DE BOER, P. L. (2009a) Types of Martian fan-shaped sedimentary deposits. *Lunar and Planetary Science Conference*, 40th. Abstract # 1901.
- DE VILLIERS, G.; KLEINHANS, M; POSTMA, G.; HAUBER, E.; DE JONG, S. and DE BOER, P. L. (2009b) Martian Fan-shaped Sedimentary Deposits. *Lunar and Planetary Science Conference*, 40th. Abstract # 1006.
- DESIR, G.; MARÍN, C. y GUTIÉRREZ, M. (2009a) Características de la erosión en áreas acarcavadas de la Fm. Tudela (Bárdenas Reales, Navarra). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35(2). 195-213.
- DESIR, G.; MARÍN, C. y GUTIÉRREZ, M. (2009b) Influencia de los procesos de sofusión (Piping) en la evolución del modelado. Bárdenas Reales (Navarra). *Congreso Internacional sobre desertificación*, Murcia (España).
- DESIR, G y MARÍN, C. (2009) Evolución y procesos de erosión en Gullies. Bárdenas Reales (Navarra). *Congreso Internacional sobre desertificación*, Murcia (España).
- DOHM, J.M.; ANDERSON, R.C.; BARLOW, N.G.; MIYAMOTO, H.; DAVIES, A.G.; TAYLOR, G.J.; BAKER, V.R.; BOYNTON, W.V.; KELLER, J.; KERRY, K.; JANES, D.; FAIRÉN, A.G.; SCHULZE-MAKUCH, D.; GLAMOCLIJIA, M.; MARINANGELI, L.; ORI, G.G.; STROM, R.G.; WILLIAMS, J.P.; FERRIS, J.C.; RODRÍGUEZ, J.A.P.; DE PABLO, M.A. and KARUNATILLAKE, S. (2008) Recent geological and hydrological activity on Mars: The Tharsis/Elysium corridor. *Planetary and Space Science*, 56(7). 985-1013.
- DUNDAS, C.M.; OKUBO, C.; MCEWEN, A.S. and THE HIRISE TEAM (2007). Early HiRISE observations of fractured mounds. *Lunar and Planetary Science Conference*, XXXVIII. Abstract #2173.
- FAIREN, A.G. (2010) A cold and wet Mars. *Icarus* (En prensa).
- FAIREN, A.G.; DOHM, J. M.; BAKER V.R.; DE PABLO, M.A.; RUIZ, J.; FERRIS, J. C. and ANDERSON, R.C. (2003) Episodic flood inundations of the northern plains of Mars. *Icarus*, 165. 53-67.
- FORGET, F.-HOURDIN, F., FOURIER, R., HOURDIN, C., TALAGRAND, O., COLLINS, M., LEWIS, S.R., READ, P.L., HOUT, J.P. (1999) Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km. *Journal of Geophysical Research*, 104. 24155-24175.
- HANSEN, C. J.; PORTYANKINA, G.; THOMAS, N.; BYRNE, S. and MCEWEN, A. (2010b) HiRISE images of spring on Mars. *Lunar and Planetary Science Conference*, 41st. Abstract # 2029.

- HANSEN, C.J.; THOMAS, N.; PORTYANKINA, G.; McEWEN, A.; BECKER, T.; BYRNE, S.; HERKENHOFF K.; KIEFFER, H. and MELLON M. (2010a) HiRISE observations of gas sublimation-driven activity in Mars' southern polar regions: I. Erosion of the surface. *Icarus*, 205. 283–295.
- HANSEN, V.L. (2000) Geologic mapping of tectonic planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 176. 527-542.
- HASKIN, L. A.; WANG, A.; JOLLIFF, B.L.; MCSWEEN, H.Y.; CLARK, B.C. ; DES MARAIS, D.J.; MCLENNAN, S.M.; TOSCA, N.J.; HUROWITZ, J.A.; FARMER, J.D.; YEN, A.; SQUYRES, S.W.; ARVIDSON, R.E.; KLINGELHÖFER, G.; SCHRÖDER, C.; DE SOUZA, P.A.; MING, D.W.; GELLERT, R.; ZIPFEL, J.; BRÜCKNER, J.; BELL, J.F.; HERKENHOFF, K.; CHRISTENSEN, P.R.; RUFF, S.; BLANEY, D.; GOREVAN, S.; CABROL, N.A.; CRUMPLER, L.; GRANT, J. and SODERBLOM, L. (2005) Water alteration of rocks and soils on Mars at the Spirit rover site in Gusev crater. *Nature*, 436, 66-69. doi:10.1038/nature03640.
- HELDMANN, J.L.; CARLSSON, E.; JOHANSSON, H.; MELLON, M.T. and TOON, O.B. (2007) Observations of martian gullies and constraints on potential formation mechanisms. *Icarus* 188, 324-344.
- HESS, S.L.; HENRY, R.M. and TILLMAN, J.E. (1979). The seasonal variation of atmospheric pressure on Mars as affected by the south polar cap. *Journal of Geophysical Research*, 84, 2923-2927.
- IRWIN, R.P. and WATTERS, T. (2004), Sedimentary resurfacing and fretted terrain development along the crustal dichotomy boundary, Aeolis Mensae, Mars. *Journal of Geophysical Research*, 109. doi:10.1029/2004JE002248.
- IRWIN, R.P., HOWARD, A.D., CRADDOCK, R.A., and MOORE, J.M. (2005) An intense terminal epoch of widespread fluvial activity on early Mars: 2. Increased runoff and paleolake development. *Journal of Geophysical Research*, 110. doi: 10.1029/2005JE002460.
- JONES, J.A.A. (1981) The nature of soil piping: a review of research. *Geobooks. BGRG Research Monograph Series*, 3. 301pp.
- KARGEL, J.S. (2004) Mars: a warmer, wetter planet. *Praxis Publishing*, UK. 557 pp.
- KIEFFER, H.H.; MARTIN, T.Z.; PETERFREUNDA, R. and JAKOSKY, B.M. (1977). Thermal and albedo mapping of Mars during the Viking primary mission. *Journal of Geophysical Research*, 82. 4249-4291.
- KLEINHANS, M.G.; VAN DE KASTEELE, H.E.; HAUBER, E.; DE VILLIER, G.; POSTMA, G.; DE JONG, S. and DE BOER, P.L. (2009a) Palaeoflow and sediment delivery reconstructions from Martian delta morphology by combined physics-based numerical modelling and HRSC DTM analysis. *Lunar and Planetary Science Conference*, 40th. Abstract #1495.
- KLEINHANS, M.G.; VAN DE KASTEELE, H.E. and HAUBER E. (2009b) Palaeoflow reconstruction from fan delta morphology on Mars. *European Planetary Science Conference*, Abstract 10102. 15.

- KNEISSL, T.; REISS, D.; VAN GASSELT, S. and NEUKUM, G. (2010) Distribution and orientation of northern-hemisphere gullies on Mars from the evaluation of HRSC and MOC-NA data. *Earth and Planetary Science Letters* 294. 357-367.
- KRAAL, E.R.; ASPHAUG, E.; MOORE, J.M.; HOWARD, A. and BREDT, A. (2008) Catalogue of large alluvial fans in martian impact craters. *Icarus*, 194. 101–110.
- LASKAR, J.; CORREIA, A.C.M.; GASTRINEU, M.; JOUTEL, F.; LEVRARD, B and ROBUTEL, P. (2004). Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars. *Icarus*, 170. 343-364.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (1986) Procesos de erosión en túnel (piping) en cuencas sedimentarias de Murcia (España). Estudio preliminar mediante difracción de rayos X y microscopio electrónico de barrido. *Papeles de Geografía Física*, 11. 7-20.
- MALIN, M.C., EDGETT, K.S. (2000). Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars. *Science*, 302. 1931-1934.
- MÁRQUEZ, A., DE PABLO, M.A., OYARZUN, R., VIEDMA, C. (2005). Evidence of gully formaion by regional groundwater flow in the Gorgonum-Newton region (Mars). *Icarus*, 179. 398-414.
- MARTÍN-GONZÁLEZ, F.; DE PABLO, M.A. and PACIFICI, A. (2007) Alignments mapping and structural analysis of western sector of Nepenthes Mensae, Mars. *Geophysical Research Abstracts*, 9. 07796.
- MELLON, M.M. and PHILLIPS, R.J. (2001) Recent gullies on Mars and the source of liquid water. *Journal of Geophysical research*, 106, 1-15.
- MELOSH, J. (1989) Impact cratering: A geologic process. *Oxford University*, New York.
- MURCHIE, S.; ARVIDSON, R.; BEDINI, P.; BEISSER, K.; BIBRING, J.P.; BISHOP, J.; BOLDT, J.; CAVENDER, P.; CHOO, T.; CLANCY, R.T.; DARLINGTON, E.H.; DES MARAIS, D.; ESPIRITU, R.; FORT, D.; GREEN, R.; GUINNESS, E.; HAYES, J.; HASH, C.; HEFFERNAN, K.; HEMMLER, J.; HEYLER, G.; HUMM, D.; HUTCHESON, J.; IZENBERG, N.; LEE, R.; LEES, J.; LOHR, D.; MALARET, E.; MARTIN, T.; MCGOVERN, J. A; MCGUIRE, P.; MORRIS, R.; MUSTARD, J.; PELKEY, S.; RHODES, E.; ROBINSON, M.; ROUSH, T.; SCHAEFER, E.; SEAGRAVE, G.; SEELOS, F.; SILVERGLATE, P.; SLAVNEY, S.; SMITH, M.; SHYONG, W.J.; STROHBEHN, K.; TAYLOR, H.; THOMPSON, P.; TOSSMAN, B.; WIRZBURGER, M. and WOLFF M. (2007) Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). *Journal of Geophysical Research*, 112. doi:10.1029/2006JE002682, 2007.
- PAGE, D.P. (2007). Recent low-latitude freeze-thaw on Mars. *Icarus*, 189. 83-117.
- PARKER, G.G. (1963) Piping a geomorphic agent in landform development of the drylands. *International Association Scientific Hydrology. Publication* 65, 83-98.
- PARKER, T.J.; GORSLINE, D.S.; SAUNDERS, R.S.; PIERI, D.C. and SCHNEEBERGER, D.M. (1993) Coastal geomorphology of the Martian northern plains. *Journal of Geophysical Research*, 98(E6). 11,061–11,078.

- PIQUEUX, S; BYRNE, S and RICHARDSIN, M.I. (2003) Sublimation of Mars's southern seasonal CO₂ ice cap and the formation of spiders. *Journal of Geophysical Research*, 108. doi:10.1029/2002JE002007.
- SKINNER, J.A and TANAKA, K.L. (2007) Evidence for and implications of sedimentary diapirism and mud volcanism in the southern Utopia highland-lowland boundary plain, Mars. *Icarus*, 186. 41-59.
- SKINNER, J.A. and MAZZINI, A. (2009) Martian mud volcanism: terrestrial analogs and implications for formational scenarios. *Marine and Petroleum Geology*, 26. 1866-1878.
- SOARE, R.J.; KARGEL, J.S.; OSINSKI, G.R. and COSTARD, F. (2007) Thermokarst processes and the origin of crater-rim gullies in Utopia and western Elysium Planitia. *Icarus*, 191. 95-112.
- SOARE, R.J.; OSINSKI, G.R. and COSTARD, F.M. (2008). Recent, late Amazonian pingos, ice-rich landscapes and periglacial ponding in Utopia and western Elysium Planitia, Mars. *Lunar and Planetary Science Conference*, 39th. Abstract # 1315.
- SOARE, R.J.; OSINSKI, G.R. and ROEHM, C.L. (2008) Thermokarst lakes and ponds on Mars in the very recent (Late Amazonian) past. *Earth and Planetary Letters*, 272. 382-393.
- SQUYRES, S.W.; ARVIDSON, R.E.; BELL, J.F.; BRÜCKNER, J.; CABROL, N.A.; CALVIN, W.; CARR, M.H.; CHRISTENSEN, P.R.; CLARK, B.C.; CRUMPLER, L.; DES MARAIS, D.J.; D'USTON, C.; ECONOMOU, T.; FARMER, J.; FARRAND, W.; FOLKNER, W.; GOLOMBEK, M.; GOREVAN, S.; GRANT, J.A.; GREELEY, R.; GROTZINGER, J.; HASKIN, L.; HERKENHOFF, K.E.; HVIID, S.; JOHNSON, J.; KLINGELHÖFER, G.; KNOLL, A.H.; LANDIS, G.; LEMMON, M.; LI, R.; MADSEN, M.B.; MALIN, M.C.; MCLENNAN, S.M.; MCSWEEN, H.Y.; MING, D.W.; MOERSCH, J.; MORRIS, R.V.; PARKER, T.; RICE, J.W.; RICHTER, L.; RIEDER, R.; SIMS, M.; SMITH, M.; SMITH, P.; SODERBLUM, L.A.; SULLIVAN, R.; WÄNKE, H.; WADOWIAK, T.; WOLFF, M. and YEN, A. (2004) The Opportunity Rover's Athena Science Investigation at Meridiani Planum, Mars. *Science*, 306. 1698 – 1703. DOI: 10.1126/science.1106171.
- SQUYRES, SW and KNOLL, A.H. (2005) Origin, diagenesis, and implications for life on Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 240. 1-10.
- TANAKA, K.L.; SCOTT, D.H. and GREELEY, R. (1992) Global stratigraphy. In: Mars. *Arizona University Press*, Tucson. 345-382.
- TANAKA, K.L.; SKINNER, J.A. and HARE, T.M. (2005) Geologic map of the northern plains of Mars. *U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey Scientific Investigations map*, 2888.
- THOMAS, N.; HANSEN, C.J.; PORTYANKINA, G. and RUSSELL, P.S. (2010) HiRISE observations of gas sublimation-driven activity in Mars' southern polar regions: II. Surficial deposits and their origins. *Icarus*, 205. 296–310.
- VALENCIANO, A.; DE PABLO, M.A.; PACIFICI, A. (2009) The role of water on the evolution of the Nepenthes Mensae region of Mars. *Lunar and Planetary Science Conference*, 40th. Abstract #1052.