

EL ORIGEN GLACIAR DE LA AUREOLA DEL VOLCAN ARSIA MONS, MARTE

A. Márquez González* y F. Anguita Virella*

RESUMEN

Al pie de los grandes volcanes marcianos del domo de Tharsis aparecen unas formas lobuladas que han recibido el nombre de aureolas. El origen de estas estructuras ha sido objeto de un largo debate entre dos hipótesis principales que las interpretan como deslizamientos de ladera o como glaciares de montaña. En este trabajo se estudia la mejor desarrollada de estas aureolas, la de Arsia Mons, llegándose a la conclusión de que la hipótesis glaciaria explica mejor las características del depósito, y en concreto la existencia de estratificación, las crestas (que se interpretan como glaciotectónicas) y los terrenos lobulados. Por último se discute la conexión de estos depósitos con los modelos paleoclimáticos actuales sobre Marte, lo que lleva a la conclusión de que las aureolas deben ser depósitos glaciares recientes relacionados con repetidos episodios de clima cálido (ciclos de Baker), provocados por la acción de los canales de desbordamiento.

Palabras clave: Marte, Arsia Mons, aureolas, glaciares, océanos.

ABSTRACT

Huge lobate deposits called aureoles are covering the base of the giant Martian volcanic constructs of Tharsis dome. The origin of these structures has been a matter of debate between two competing hypotheses: volcanic landslides or mountain glaciers. Here we consider the most important of the aureoles, near Arsia Mons, concluding that the glacier model explains best the deposit features, such as the layering, the ridges (interpreted as glaciotectonic ones), and the lobated terrain. We then discuss the fit of these proposed glacier deposits in the present paleoclimatic Martian models. The aureoles could be key elements in the confirmation of the «Baker cycle» model of repeated episodes of temperate, humid, sea-dominated climates coincident in time with the outflow channels activity.

Key words: Mars, Arsia Mons, aureoles, glaciers, oceans.

Introducción

Una de las principales características geológicas del planeta Marte es la existencia en su superficie de enormes volcanes. Los más importantes son Olympus Mons, y los tres volcanes de Tharsis (Arsia, Pavonis y Ascraeus Mons; Carr, 1981). Estos edificios son similares a los volcanes en escudo terrestre, formados por lavas poco viscosas, sin muestras de vulcanismo explosivo, y con calderas que presentan rasgos típicos de colapso tras el vaciado de lagos de lava.

Al pie de estos cuatro grandes volcanes aparecen unas formas lobuladas compuestas de terreno rugoso que han recibido el nombre de aureolas. La aureola de Olympus Mons es la más grande —700 km en

dirección NO— y compleja de todas al estar formada por varios lóbulos superpuestos (Morris, 1982). De las aureolas de los tres volcanes de Tharsis la de Arsia Mons es la mayor y mejor estudiada. El origen de las aureolas sigue siendo objeto de debate, y en la actualidad se proponen dos teorías: las aureolas podrían ser depósitos producidos por una avalancha volcánica en un flanco del edificio (Carr *et al.*, 1977; Zimbelman y Edgett, 1992) o las morrenas dejadas por un antiguo glaciar de montaña (Lucchitta, 1981; Battistini, 1985; Anguita y Moreno, 1992; Hodges y Moore, en prensa). En este trabajo estudiaremos en detalle la aureola de Arsia Mons, los aspectos de ésta que nos llevan a considerarla un depósito glaciario, y cómo encaja esta hipótesis en los modelos paleoclimáticos que exis-

* Departamento de Petrología y Geoquímica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense. 28040 Madrid.

ten sobre Marte en la actualidad. Para este estudio se han utilizado imágenes enviadas por las sondas norteamericanas Viking Orbiter, con resoluciones de 140 a 170 m/píxel.

La aureola de Arsia Mons

La aureola de Arsia Mons (fig. 1a; Carr *et al.*, 1977; Zimbelman y Edgett, 1992; Anguita y Moreno, 1992) se desarrolla únicamente en el lado NO del volcán, al igual que las de Pavonis y Ascraeus, mientras que la de Olympus se desarrolla hacia la vertiente Norte. El desnivel topográfico que salva en su recorrido es de 5 km, entre los 11 km de altitud de su inicio y los 6 km de la base (Zimbelman y Edgett, 1992). La extensión de la aureola de Arsia Mons es de más de 100.000 km², y en ella se distinguen tres tipos de terreno (fig. 1b; Anguita y Moreno, 1992): a) una zona exterior de *terreno estriado* formado por crestas subparalelas; b) un *terreno rugoso*, formado por colinas y depresiones alargadas, y c) un *terreno lobulado* con claros signos de repetido flujo plástico gravitacional.

El terreno estriado está delimitado hacia el exterior por una cresta más prominente que las demás

(fig. 2). Hacia el interior aparecen también otras crestas pronunciadas y se observa que el tránsito con el terreno rugoso es gradual, pareciendo este último una versión desorganizada del primero. Las crestas se disponen paralelamente al borde de la aureola y algunas de ellas se bifurcan y convergen. En este mismo terreno aparece un cráter de impacto anterior a la formación de la aureola, ya que las crestas atraviesan sus depósitos de expulsión, aunque sin modificarlos.

El terreno rugoso —denominado por los autores americanos *sandpaper-textured*— forma la parte más importante de la aureola. Está formado por una sucesión de colinas alargadas de unos 100 a 500 m de ancho (Carr, 1981), aproximadamente paralelas al borde de la aureola, aunque la pauta es mucho menos clara que en el terreno estriado.

El terreno lobulado (fig. 3) aparece en la zona proximal de la aureola, se dispone claramente sobre el terreno rugoso, y parece originarse en un graben desarrollado en las laderas del edificio. Los lóbulos cubren el fondo del graben y fluyen ladera abajo durante más de 150 km, indicando claramente la dirección del flujo. En algunos puntos se observan lineaciones de flujo superpuestas a otras más antiguas, lo que parece indicar varios momentos de

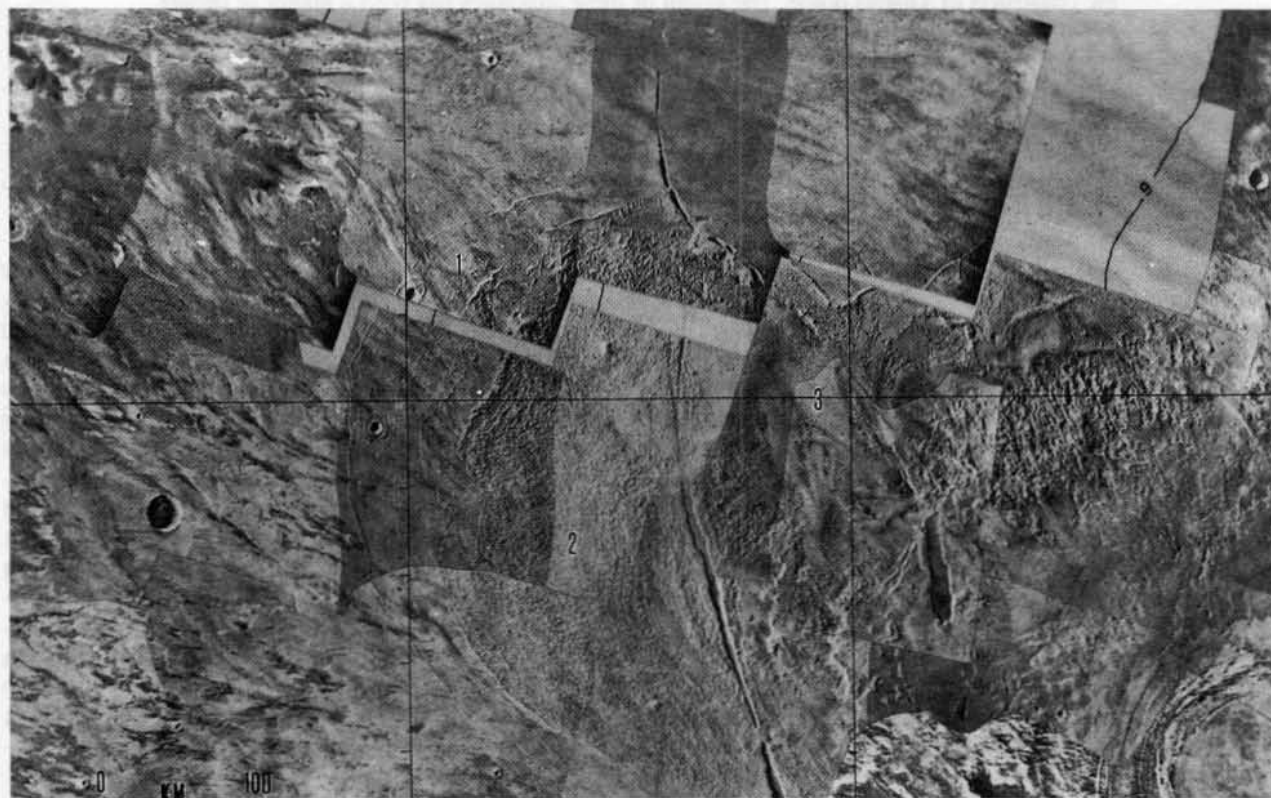


Fig. 1.—a) Fotomosaico de la aureola de Arsia Mons: 1) terreno estriado, 2) terreno rugoso y 3) terreno lobulado.

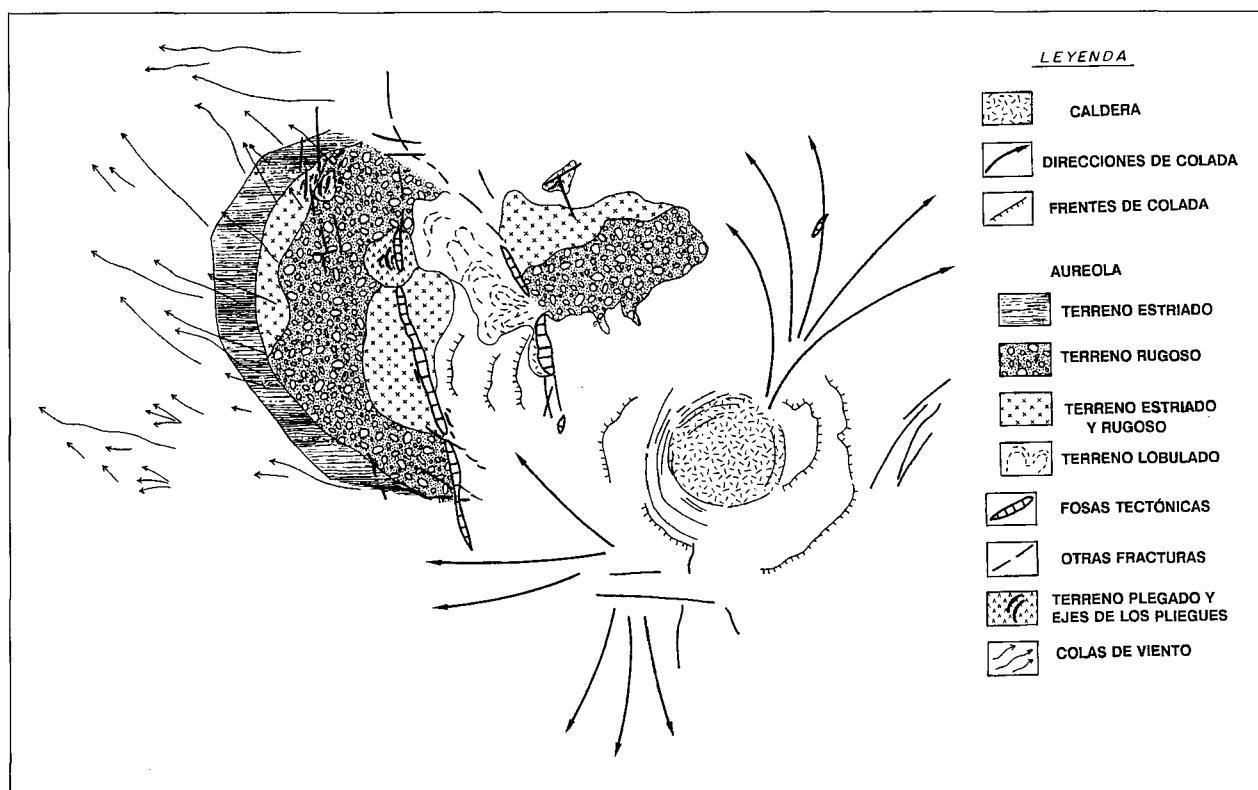


Fig. 1.—b) Esquema geológico de la aureola (según Anguita y Moreno, 1992).

flujo con pautas direccionales muy similares. El aspecto de este terreno recuerda al de algunos glaciares de roca terrestres, y también se asemeja al de los taludes de derrubios lobulados que aparecen en el fondo de algunos cráteres en Marte (Lucchita, 1981; Squyres, 1989).

Una característica a resaltar es la no existencia de cráteres de impacto en la aureola a pesar de que la buena resolución de las imágenes permitiría identificar cráteres de muy pequeño tamaño. Esto indica que la aureola debe ser muy joven, con una edad probable de pocos millones de años, lo que la situaría entre los terrenos más jóvenes del planeta, Amazónico Superior (menos de 250 millones de años) en la terminología estratigráfica marciana (Tanaka, 1986).

Origen de la aureola

Como ya hemos dicho, el origen de esta aureola es objeto de debate entre dos teorías. Inicialmente se interpretó como una gran avalancha volcánica que habría afectado al flanco NO del volcán (Carr *et al.*, 1977; Zimbelman y Edgett, 1992). El hecho de que en los tres edificios de Tharsis las avalan-

chas sólo se hubiesen desarrollado hacia el flanco NO estaría motivado por el hecho de que ésta es la dirección del gradiente topográfico regional más importante, lo que produciría la inestabilidad de esa vertiente.

Sin embargo, la hipótesis de la avalancha volcánica presenta una serie de deficiencias. En primer lugar, una avalancha de esta magnitud debería haber dejado en la ladera del volcán una clara marca en forma de anfiteatro, que sin embargo no existe. Aunque aparece un escarpe en la ladera Oeste, su pequeño relieve implica que el volumen de material removilizado es un orden de magnitud menor que el necesario para explicar la aureola (Zimbelman y Edgett, 1992). Este hecho ha llevado a autores partidarios de la hipótesis del deslizamiento a proponer la participación de material piroclástico en la aureola (*ibid.*). Para éstos, el terreno lobulado estaría formado por depósitos piroclásticos que podrían emanar del graben.

En segundo lugar, la relación del terreno estriado con el cráter de impacto de la figura 2 parece muy difícil de explicar en esta hipótesis, ya que un transporte por avalancha afectaría al cráter, modificándolo de forma importante. Si el cráter fuese posterior a la aureola, sus depósitos de expulsión deberían



Fig. 2.—Imagen del borde externo de la aureola de Arsia Mons. A) Terreno estriado (crestas glaciotectónicas). B) Terreno rugoso. C) Cresta final más pronunciada (morrena frontal). D) Colas de viento indicando viento del SE. Se puede apreciar la relación del cráter de impacto con las crestas de la aureola (ver texto) y el tránsito gradual entre los terrenos estriado y rugoso, que en algunas zonas. E). Se confunden. Imagen Viking Orbiter 42B35.

ocultar las crestas del terreno estriado, lo que no sucede.

Por último, existe una nueva objeción de peso a esta teoría, y es el descubrimiento de pliegues de origen tectónico en el terreno rugoso (fig. 4; Anguita y Moreno, 1992). El plegamiento se produciría probablemente en relación con una etapa de movimiento transcuriente de las fracturas que forman el graben que atraviesa la aureola. La existencia de estos pliegues se pone de manifiesto por la presencia en este terreno de una serie de capas de poco espesor que definen la forma del pliegue y permiten identificarlo en las imágenes. La existencia de una estratificación tan fina en un depósito de avalancha de este tipo es muy improbable.

La otra hipótesis que se ha propuesto para explicar el origen de la aureola es que ésta sea el depósito de un aparato glaciar desarrollado en la cara NO del volcán (Lucchita, 1981; Battistini, 1985; Anguita y Moreno, 1992; Hodges y Moore, en prensa). Así, el terreno estriado estaría formado por una serie de crestas glaciotectónicas (Anguita y Moreno, *ibid.*), las cuales se producen en las zonas dista-

les de ciertos aparatos glaciares cuando el hielo más frío se opone al movimiento, produciéndose en su interior fallas inversas que afectan a parte de la morrena basal. Este modo de formación sí es compatible con la relación entre crestas y cráter de impacto antes mencionada, ya que las crestas afectarían a los depósitos del cráter desde abajo implicándolos en las fallas pero sin modificarlos drásticamente. La cresta exterior más prominente sería la morrena terminal. La presencia de varias crestas pronunciadas en el terreno podría señalar la situación de distintas morrenas terminales, lo que estaría indicando la existencia de diversas etapas de retroceso y estabilización del glaciar.

El terreno rugoso estaría formado por las morrenas de fondo del glaciar, mientras que el terreno lobulado sería el resultado de la acción de glaciares de roca, que arrastrarían el material de las morrenas cuando el hielo se hubiese retirado. La relación de este terreno lobulado con el graben, y la actividad volcánica que existe en éste, nos hacen pensar que quizás podría haber una relación entre ambos procesos: el calor producido



Fig. 3.—Imagen del terreno lobulado de la aureola de Arsia Mons. El material lobulado surge del graben, y cubre el terreno rugoso. Imagen Viking Orbiter 42B13.



Fig. 4.—Imagen de los pliegues que aparecen en el terreno rugoso de la aureola de Arsia Mons, y que se ponen de manifiesto por la existencia de una fina estratificación en el interior de la aureola. La relación de los ejes de los pliegues con el graben y su curvatura son algunas de las evidencias de que éste puede haber desarrollado en algún momento movimiento en dirección. Imagen Viking Orbiter 42B37.

por la actividad volcánica haría subir la temperatura del hielo intersticial que quedase entre los depósitos morrénicos del glaciar, aumentando su capacidad de fluir y provocando la formación de

glaciares de roca. La hipótesis de que este terreno lobulado esté formado por material piroclástico procedente del graben parece menos consistente debido a la gran semejanza de este terreno con glaciares de roca y taludes de derrubio (Lucchitta, 1981; Squyres, 1989) y a la falta de otras evidencias de vulcanismo explosivo en el resto de los volcanes de Tharsis.

La existencia de una secuencia estratificada en los depósitos sí es compatible con una deposición por hielo. El hecho de que los glaciares sólo se hubiesen desarrollado en las laderas NO de los edificios debe estar relacionado con el modo concreto de formación de éstos. Si los glaciares se hubiesen formado por precipitación directa de nieve (Anguita y Moreno, *ibid.*) el desarrollo exclusivo en estas laderas se debería al efecto de pantalla que los edificios producen respecto al viento dominante en la zona, que es, según se observa por las colas de viento existentes en la región, de dirección SE (fig. 2). Así, la nieve se depositaría únicamente en la ladera protegida mientras que en las otras el viento produciría su ablación, impidiendo su transformación en hielo. En la Tierra hay diversos ejemplos de glaciares de montaña asimétricos desarrollados únicamente en las laderas protegidas.

Sin embargo, si como propone Battistini (1985), el glaciar se hubiese formado por la congelación en la superficie de flujos de agua provocados por la fusión del permafrost (debido al calor del volcán) la asimetría hacia el NO estaría causada por el desnivel topográfico regional hacia esa ladera, el cual provocaría que las corrientes de agua fluyesen en esa dirección. La hipótesis de la formación por precipitación de nieve parece más correcta, ya que aunque el desnivel regional sea hacia el NO resulta improbable que no se hayan producido algunos flujos en otras direcciones.

Las principales objeciones de los partidarios de la teoría del deslizamiento contra un origen glaciar de la aureola son que ésta no es similar a los terrenos estratificados que aparecen bajo los casquetes polares marcianos, y respecto a cuyo origen glaciar hay acuerdo. Además, las aureolas aparecen en latitudes ecuatoriales —entre 10° N y 10° S— y altitudes de entre 6 y 10 a 11 km donde la cantidad de vapor atmosférico es baja y no permitiría la acumulación de hielo en superficie (Zimelman y Edgett, 1992).

En nuestra opinión, la falta de similitud de las aureolas con los depósitos estratificados polares se debe a sus diferentes mecanismos de formación. Aunque ambos son depósitos glaciares, estos últimos se forman como morrenas de fondo de grandes casquetes continentales. Su fina estratificación viene dada por la alternancia de etapas de sedimentación con otras de no depósito, causadas a su vez

por alteraciones climáticas que influyen en el tamaño de los casquetes. Las aureolas se producen por la acción de glaciares de montaña que actuaron en épocas de clima distinto al actual, y que al desaparecer nos dejaron los depósitos que ahora forman las aureolas. El hecho de que el hielo sea actualmente inestable en superficie en el lugar donde están las aureolas no impide su formación en un momento en que el clima del planeta fuese distinto al actual.

Posibilidad de glaciares de montaña en Marte

¿Cómo debió ser el clima de Marte para permitir la existencia de glaciares en las latitudes y altitudes en que se encuentran las aureolas? En la actualidad Marte posee una atmósfera tan tenue —6 mbar de presión media— que hace que su temperatura superficial sea muy baja, -23°C de promedio (Hess *et al.*, 1977). Su composición está dominada por el CO_2 (95 %) con cantidades importantes de nitrógeno (2,7 %) y argón (1,6 %) (Owen *et al.*, 1977). Estas condiciones hacen que el agua líquida sea inestable en toda la superficie, mientras que el hielo sólo es estable en latitudes altas, donde de hecho aparece formando parte del casquete residual del polo Norte (Kieffer *et al.*, 1976).

Para que en Marte puedan ser estables glaciares en latitudes ecuatoriales a gran altitud, tendría que haber en el planeta una atmósfera más densa que la actual que sustentase cantidades de vapor de agua muy superiores a las presentes. Sólo así sería posible la existencia de precipitaciones, y por lo tanto de hielo estable en la superficie de Tharsis (Lucchitta, 1984). Por tanto si las aureolas se formaron por la acción de glaciares de montaña, el clima de Marte debió ser, en un pasado cercano a juzgar por la juventud de las aureolas, muy distinto al actual.

Los depósitos estratificados polares

Desde la llegada en 1976 de las imágenes de Marte enviadas por las sondas Viking se observó que las huellas de cambios climáticos en el pasado marciano son muy abundantes e incluyen datos geomorfológicos y geoquímicos. Entre los primeros destacan los canales de escorrentía, la erosión de cráteres y los depósitos estratificados polares (Carr, 1981; Márquez, 1993). Los canales de escorrentía y la erosión de cráteres demuestran la existencia de un período, anterior al fin del Gran Bombardeo Meteorítico, con un clima más cálido que permitiera la circulación restringida de agua líquida y tasas de erosión varios órdenes de magnitud superiores a las

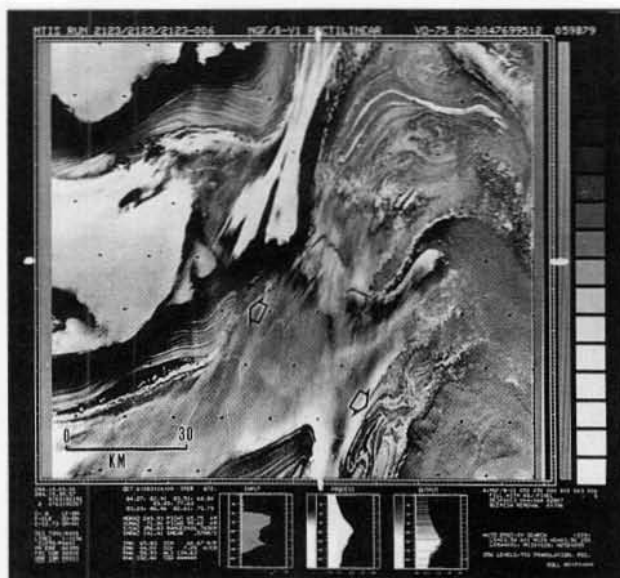


Fig. 5.—Imagen de los depósitos estratificados polares en el borde del casquete polar Norte de Marte. Las capas se pueden seguir durante cientos de kilómetros. En algunos puntos se observan discordancias dentro de la serie. Imagen Viking Orbiter 059B79.

actuales. Si la analogía con los datos lunares es válida, el Gran Bombardeo Meteorítico acabó hace unos 3.900 m.a. (Carr, 1981), por lo que no es posible relacionar las aureolas con este episodio, ya que éstas son mucho más modernas.

Los depósitos estratificados polares (fig. 5) aparecen bajo ambos casquetes polares y están formados por una secuencia aterrazada de capas de espesor decimétrico (Cutts, 1973). Su formación parece relacionada con oscilaciones en el tamaño de los casquetes polares, que producen períodos de depósito de polvo en el fondo del casquete alternando con otros de no deposición. Estas alternancias en el tamaño de los casquetes deben estar motivadas por cambios climáticos cíclicos, posiblemente relacionados con variaciones de los parámetros orbitales de Marte, variaciones similares a las que en la Tierra provocan las alternancias de períodos glaciales e interglaciales durante una glaciación. Una característica importante de estos depósitos en relación con nuestro estudio es que son muy jóvenes. De hecho, la escasez en ellos de cráteres de impacto (Cutts *et al.*, 1976) indica que su edad debe ser muy similar a la de las aureolas.

Esta similitud de edades entre las aureolas —un posible depósito glaciar— y los depósitos estratificados polares podría indicar existencia de una relación en la formación de ambos. En principio parece lógico pensar que las épocas de mayor extensión del casquete glaciar indicarían unas condiciones de

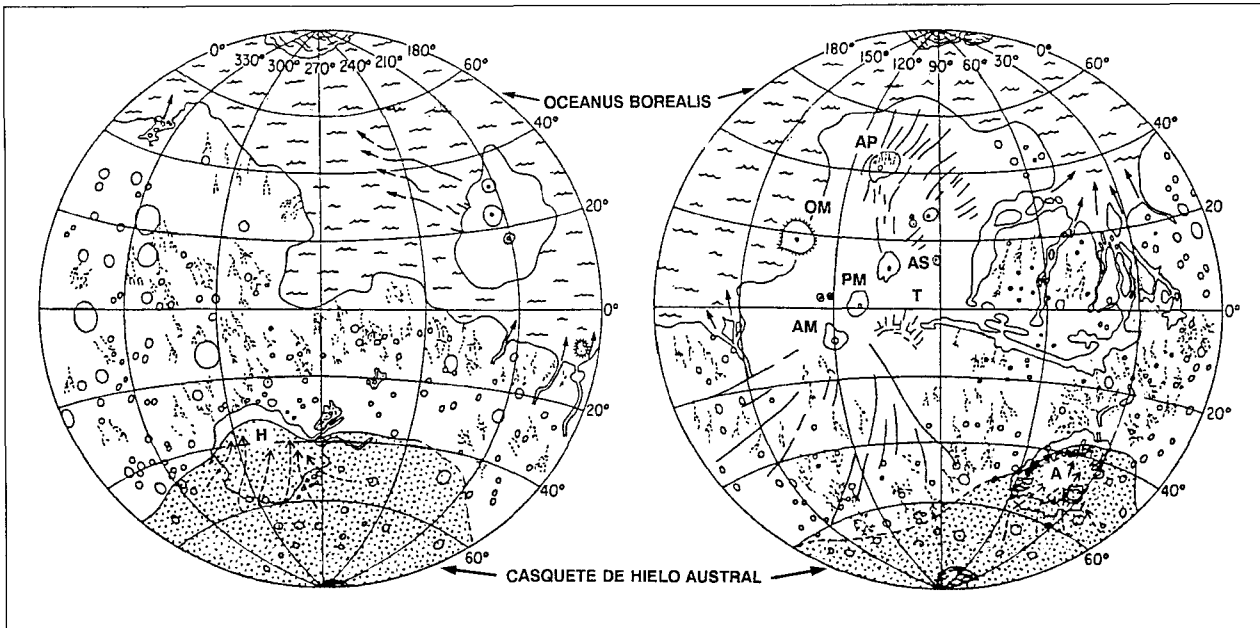


Fig. 6.—Esquema de Baker *et al.* (1991) de los dos hemisferios marcianos mostrando la distribución hipotética del océano boreal y el casquete glaciar austral durante el desarrollo de uno de los ciclos de clima cálido. Otras formas mencionadas en el texto: Olympus Mons (OM), Arsia Mons (AM), Pavonis Mons (PM), Ascraeus Mons (AS), Domo de Tharsis (T), Alba Patera (AP), Hellas (H) y Argyre (A).

«glaciación» en Marte, lo que facilitaría la formación de glaciares de montaña a gran altitud en el ecuador. Las diferentes morrenas terminales de la aureola de Arsia Mons podrían ser correlacionables con las diversas etapas de crecimiento del casquete. En este esquema, podríamos pensar que Marte atraviesa actualmente un período interglacial en el cual, por la actual inclinación del eje de rotación (25°), las condiciones climáticas permiten únicamente unos casquetes de tamaño intermedio, pero no la existencia de glaciares de montaña en latitudes ecuatoriales.

Este modelo tiene un importante problema, y es que las variaciones en la oblicuidad que presenta Marte hacen variar únicamente la presión atmosférica en el planeta entre 0,3 y 30 mbar (Ward *et al.*, 1974). Esto hace que el límite de estabilidad del hielo en superficie, actualmente en 40° de latitud, oscile 5° hacia el ecuador en los momentos de alta oblicuidad y 3° hacia los polos en los de baja oblicuidad (Lucchitta, 1984). Estos valores son demasiado bajos para permitir la estabilidad del hielo en las latitudes de los volcanes de Tharsis (entre 10° S y 10° N). Las variaciones climáticas provocadas por las oscilaciones orbitales de Marte no pueden explicar la existencia de glaciares de montaña en Tharsis, por lo que no es posible correlacionar éstos con los depósitos estratificados polares.

Océanos y glaciares en Marte: el modelo de Baker

Baker *et al.* (1991), han propuesto un revolucionario modelo sobre el clima de Marte después del fin del Gran Bombardeo Meteorítico. Está basado en la existencia de redes de aspecto fluvial en las laderas de un volcán del hemisferio Norte, Alba Patera (Gullick y Baker, 1989), que son muy posteriores al fin del Gran Bombardeo Meteorítico (Amazónico, menos de 1.800 millones de años), y en evidencias geomorfológicas que indican la probable existencia de océanos o grandes lagos en el hemisferio Norte marciano (Parker *et al.*, 1989) y de casquetes glaciares en ambos hemisferios (Kargel y Strom, 1992) también de posible edad Hespérica (entre 3.500 y 1.800 millones de años) y Amazónica. Este modelo propone que los grandes flujos catastróficos de agua que formaron los canales de desbordamiento (y que fueron provocados por la actividad ígnea en Tharsis) permitieron la formación repetida de océanos en el hemisferio Norte y casquetes glaciares en ambos hemisferios (fig. 6), lo que algunos autores (Kargel, 1993) han llamado «ciclos de Baker».

Varios de estos canales de desbordamiento podrían haber funcionado simultáneamente y haber tenido como causa común un aumento en la activi-

dad ígnea del domo de Tharsis que fundiese el permafrost de la zona. Si esto sucediera, la gran cantidad de agua puesta de forma instantánea en la superficie podría acumularse formando un océano en el hemisferio Norte y alterando el clima, debido a las grandes cantidades de CO₂ que al mismo tiempo entrarían en la atmósfera, tanto directa (en los gases volcánicos) como indirectamente (por la alteración del regolito). Este cambio en el clima y la existencia de un océano permitirían, según Baker *et al.* (*ibid.*), la formación de las redes fluviales en las laderas de Alba Patera, la formación de grandes casquetes glaciares en los dos hemisferios, y que el hemisferio Sur sufriese pocos efectos geomorfológicos al ser una zona de clima continental con pocas precipitaciones. El depósito (en forma de carbonatos) del CO₂ en el fondo del océano iría haciendo disminuir gradualmente la presión atmosférica y las temperaturas hasta que el océano se helase y desapareciese, y el clima retornase a la situación actual. Este proceso se habría repetido varias veces en la historia marciana, la última de ellas en el Amazónico Superior (hace menos de 250 m.a.).

La existencia de glaciares de montaña en los volcanes de Tharsis encaja perfectamente con este modelo climático. Las condiciones de presión y temperatura superficiales y la existencia de precipitaciones serían las adecuadas para el desarrollo de glaciares, como muestran las abundantes evidencias —eskers, kames, circos, morrenas de De Geer, «tunnel valleys»— tanto en el hemisferio Sur (regiones de Hellas y Argyre) como en el Norte (regiones de Utopia y Arcadia; Kargel y Strom, 1992; Kargel *et al.*, 1993). La gran altitud de los volcanes de Tharsis permitiría que, a pesar de situarse éstos en latitudes ecuatoriales, se produjesen en sus laderas precipitaciones de nieve que al conservarse todo el año se transformaría en hielo, formando glaciares. Alba Patera, a pesar de su latitud (40° N) no recibiría, por su menor altitud, precipitaciones de nieve sino líquidas, que provocarían la formación de las redes fluviales de sus laderas.

Discusión

Aunque el modelo de formación y disipación repetida de océanos en Marte que proponen Baker *et al.* (*ibid.*) parece dar la solución al problema paleoclimático de la existencia de glaciares de montaña en los volcanes de Tharsis, aún aparecen algunos puntos oscuros en esta hipótesis. En primer lugar, las formas glaciares de ambos casquetes indican la presencia de abundante agua líquida tanto subglaciar —presencia de eskers— como proglaciar —morrenas de De Geer—. Esto nos indica la exis-

tencia de un clima templado en el que el agua líquida es estable en la superficie, y la escorrentía subglaciar es importante. Sin embargo, en la aureola de Arsia Mons no aparecen evidencias de agua líquida, ni subglaciar ni proglaciar. En el frente del glaciar hemos visto cómo aparecían crestas glaciotectónicas pero no existen evidencias de canales de desagüe proglaciar, ni de eskers o kames en toda la aureola. Sin embargo, en el borde Norte de la aureola de Arsia Mons aparecen unas formas que podrían corresponder a morrenas de De Geer (Centeno, comunicación personal).

Aunque hasta ahora hemos visto en detalle únicamente la aureola de Arsia Mons, también los otros dos volcanes de Tharsis (Pavonis y Ascraeus Mons) poseen aureolas de terreno lobulado en sus laderas NO. Ambas son más pequeñas que la de Arsia, con 250 km de longitud la de Pavonis y 90 km la de Ascraeus. Varios autores (Zimbelman y Edgett, 1992; Hodges y Moore, en prensa) describen terreno estriado y rugoso en las aureolas de Pavonis y Ascraeus. El examen preliminar que hemos realizado de las imágenes de estos dos volcanes también confirma la similitud a grandes rasgos de las tres aureolas, por lo que parece razonable asignarlas un origen común. Asimismo, en la aureola de Pavonis aparecen formas que podrían corresponder a eskers y drumlins, lo que refuerza la hipótesis de un origen glaciar de las aureolas de los volcanes de Tharsis.

Hodges y Moore (en prensa) hacen una interesante observación en el sentido de que en los tres volcanes de Tharsis el tamaño de sus aureolas crece con la edad del edificio volcánico, de tal manera que el más antiguo —Arsia Mons— posee la aureola más extensa, mientras que el más joven —Ascraeus Mons— tiene la menos desarrollada. Según estos autores esto podría significar tanto que las aureolas se formaron durante una época glaciar cuya intensidad iba disminuyendo con el tiempo, como su formación en condiciones climáticas estáticas en cuanto a intensidad, siendo el diferente grado de desarrollo de los glaciares función del tiempo que hubiesen estado actuando. Sin embargo, si la formación de las aureolas está relacionada con etapas puntuales de clima distinto al actual por la repetida formación y disipación de océanos (Baker *et al.*, *ibid.*), y teniendo en cuenta la juventud de las aureolas, esta relación edad-tamaño es más difícil de entender. La ausencia de cráteres de impacto en la aureola indica que ésta es tan joven que la superficie actual sólo debe estar relacionada con el último de estos episodios. Es posible que la secuencia estratificada que existe en la aureola de Arsia refleje depósitos morrénicos de varios episodios glaciares distintos, ya que la edad del volcán —varios cientos de millones de años— permite perfectamente que se

hayan formado glaciares de montaña en su ladera NO en diferentes ciclos de Baker. Sin embargo la actual superficie sólo refleja el último ciclo, por lo que el hecho de que la aureola de Arsia Mons sea la mayor de las tres no puede estar relacionada con la antigüedad del volcán, sino con algún fenómeno climático, hasta el momento indeterminado, el cual provoca que las condiciones en Arsia sean más favorables al desarrollo de glaciares de montaña que en Pavonis, y en este último más que en Ascræus.

En la introducción ya mencionamos que el mayor volcán de Marte, Olympus Mons, también posee la aureola más extensa ($8 \times 10^5 \text{ km}^2$) y compleja (fig. 7). Aunque parte de la aureola está formada por un terreno rugoso parecido al de la aureola de Arsia, no aparece en ella terreno estriado. Asimismo, el análisis de las imágenes de esta aureola no ha mostrado hasta el momento ningún signo de estratificación (Morris, 1982). Aunque en la vertiente NO del escarpe que rodea al volcán aparece un terreno muy similar al lobulado de Arsia, y que podría estar formado por glaciares de roca, no hemos encontrado indicios que apunten a un origen glaciario para el conjunto de la aureola, ya que dos de los rasgos más característicos de Arsia, como son el terreno estriado y la existencia de una secuencia estratificada, no aparecen en la aureola de Olympus. Además, rodeando a todo el edificio existe un importante escarpe de más de 3 km de altura que podría ser el origen de grandes deslizamientos de las laderas del volcán que forman sus aureolas. Sin embargo la altitud de Olympus Mons, mayor que Arsia Mons, y su mayor latitud (20° N) hacen que según el modelo climático de Baker también se debiesen haber formado glaciares de montaña en sus laderas. Quizás el hecho de que Olympus Mons se sitúe muy próximo a la posible línea de costa del océano boreal marciano haya influido en su evolución morfológica. La posibilidad de que la formación de la aureola de Olympus Mons esté total o parcialmente relacionada con deslizamientos submarinos no ha sido investigada aún, aunque parece una hipótesis de trabajo interesante.

Conclusiones

El origen de la aureola de terreno rugoso que aparece en la ladera NO del volcán Arsia Mons ha sido objeto de un largo debate, habiéndose propuesto dos teorías para su formación: una gran avalancha volcánica del flanco NO del volcán, o un glaciar de montaña en esa ladera. El análisis de las imágenes enviadas por las sondas Viking parece apuntar hacia un origen glaciario: la existencia de un terreno estriado exterior similar a las crestas glaciotectónicas, un



Fig. 7.—Fotomosaico de la aureola de Olympus Mons.

terreno lobulado similar a los glaciares de roca terrestres, y una secuencia finamente estratificada (puesta de manifiesto por la existencia de pliegues tectónicos) en el interior de la aureola encajan perfectamente en la hipótesis glaciario, mientras que son difícilmente defendibles desde la hipótesis del deslizamiento.

El hecho de que el hielo sea actualmente inestable en la zona de la aureola de Arsia Mons, unido a la gran juventud del depósito —ausencia de cráteres de impacto— hacen que sea necesaria una etapa de clima distinto al actual en el pasado cercano de Marte para explicar el desarrollo de glaciares de montaña en Tharsis.

Los depósitos estratificados polares reflejan la existencia de cambios climáticos cíclicos en el pasado reciente de Marte. Sin embargo, las condiciones climáticas necesarias para formar estos depósitos no son suficientes para permitir la presencia de glaciares de montaña en latitudes ecuatoriales.

El modelo de Baker *et al.* (1991), de formación y disipación repetida de océanos en Marte parece ser la clave para entender la existencia de estos glaciares. Los momentos de formación de océanos serían épocas de clima más cálido y un activo ciclo hidrológico que permitirían la precipitación de nieve en

la ladera NO de Arsia Mons y su posterior transformación en hielo.

Podemos imaginar por tanto a Marte como un planeta que durante los últimos 3.900 millones de años de su historia ha desarrollado largos períodos de clima similar al actual jalonados por cortos episodios de clima cálido con océanos en su superficie, casquetes glaciares en sus dos hemisferios, y grandes glaciares de montaña en las laderas de los volcanes del domo de Tharsis.

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer al Dr. Michael Carr, director del Equipo de Imágenes de las sondas Viking, su permiso para utilizar las imágenes de la serie Viking usadas en este trabajo y al *World Data Center A for Rockets and Satellites* por enviarnos éstas amablemente. También estamos en deuda con el Dr. Juan de Dios Centeno (Dpto. de Geodinámica, Universidad Complutense) por su ayuda en la interpretación de los rasgos glaciares de la aureola de Arsia Mons y con los miembros del Seminario de Ciencias Planetarias de la Universidad Complutense por sus sugerencias.

Referencias

- Anguita, F. y Moreno, F. (1992). Shear-induced folding in Arsia Mons aureole: Evidence for low-latitude Martian glaciations. *Earth, Moon and Planets*, 59, 11-22.
- Baker, V. R., Strom, R. G., Gulick, V. C.; Kargel, J. S., Komatsu, G. y Kale, V. S. (1991). Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars. *Nature*, 352, 589-594.
- Battistini, R. (1985). Les volcans du dôme des Tharsis (Mars). Comparaisons avec les volcans terrestres. *Rev. Geomorph. Dyn.*, 34, 81-109.
- Carr, M. H. (1981). *The surface of Mars*. Yale Univ. Press, 232 págs, New Haven.
- Carr, M. H.; Blasius, K. R., Greeley, R.; Guest, J. E. y Murray, J. E. (1977). Observations of some Martian volcanic features as viewed from Viking orbiters. *J. Geophys. Res.*, 82, 3985-4015.
- Cutts, J. A. (1973). Nature and origin of layered deposits of the Martian polar regions. *J. Geophys. Res.*, 78, 4231-4249.
- Cutts, J. A.; Blasius, K. R., Briggs, G. A., Carr, M. H., Greeley, R. y Masursky, H. (1976). North polar region of Mars: Imaging results from Viking 2. *Science*, 194, 1329-1337.
- Gulick, V. C. y Baker, V. R. (1989). Fluvial valleys and martian paleoclimates. *Nature*, 341, 514-516.
- Hess, S. L.; Henry, R. M. y Tillman, J. E. (1977). Meteorological results from the surface of Mars: Viking 1 and 2. *J. Geophys. Res.*, 82, 4559-4574.
- Hodges, C. A. y Moore, H. J. (en prensa). Atlas of volcanic landforms on Mars. *U.S. Geological Survey Professional Papers*, 1534.
- Kargel, J. S. (1993). A wet-geology and cold-climate Mars model: Punctuation of a slow dynamic approach to an equilibrium system. *MSATT workshop of the Martian northern plains*, Fairbanks.
- Kargel, J. S. y Strom, R. G. (1992). Ancient glaciation on Mars. *Geology*, 20, 3-7.
- Kargel, J. S., Strom, R. G., Lockwood, J. y Shaw, J. (1993). Subglacial and glaciomarine processes in the martian northern plains. *Lunar and Planet. Science Conference*, XXIII, 657-658.
- Kieffer, H. H., Chase, S. C., Martin, T. Z.; Miner, E. D. y Palluconi, F. D. (1976). Martian North polar summer temperature: Dirty water-ice. *Science*, 194, 1341-1344.
- Lucchitta, B. K. (1981). Mars and Earth: Comparison of cold-climate features. *Icarus*, 45, 264-303.
- Lucchitta, B. K. (1984). Ice and debris in the Fretted Terrain, Mars. *J. Geophys. Res.*, 89, B409-B418.
- Márquez, A. (1993). *Evidencias geológicas y geoquímicas sobre la evolución del clima de Marte*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Geológicas, Univ. Complutense de Madrid (inédita), 152 págs.
- Morris, E. C. (1982). Aureole deposits of the Martian volcano Olympus Mons. *J. Geophys. Res.*, 87, 1164-1178.
- Owen, T., Biemann, K., Rushneck, D. R., Biller, J. E., Howarth, D. H. y Lafleur, A. L. (1977). The composition of the atmosphere at the surface of Mars. *J. Geophys. Res.*, 82, 4635-4639.
- Parker, T. J., Saunders, R. S. y Schneeberger, D. M. (1989). Transitional morphology in West Deuteronilus Mensae, Mars: Implications for modification of the lowland/upland boundary. *Icarus*, 82, 111-145.
- Suyres, S. W. (1989). Urey Prize Lecture: Water on Mars. *Icarus*, 79, 229-288.
- Tanaka, K. L. (1986). The stratigraphy of Mars. *J. Geophys. Res.*, 91, E139-E158.
- Ward, W. R., Murray, B. C. y Malin, M. C. (1974). Climatic variations on Mars. 2. Evolution of carbon dioxide atmosphere and polar caps. *J. Geophys. Res.*, 79, 3387-3395.
- Zimbelman, J. R. y Edgett, K. S. (1992). The Tharsis Montes, Mars: Comparisons of volcanic and modified landforms. *Proceedings of Lunar and Planetary Science*, 22, 31-44.

Recibido el 15 de agosto de 1994
Aceptado el 4 de noviembre de 1994