



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS.
GEOGRAFÍA FÍSICA

“FORMACIÓN DE BARRANCOS EN MARTE : UN NUEVO ENFOQUE”

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
YOLANDA CEDILLO FLORES

DR. HÉCTOR J. DURAND MANTEROLA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA DE LA UNAM
MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DR. JOSÉ LUGO HUBP, INSTITUTO DE GEOGRAFÍA DE LA UNAM.
DR. LORENZO VÁZQUEZ SELEM, INSTITUTO DE GEOGRAFÍA DE LA UNAM,
DR. GUSTAVO TOLSON JONES, INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y COORDINADOR
DEL POSGRADO DE CIENCIAS DE LA
TIERRA DE LA UNAM
DRA. GUADALUPE CORDERO PENSADO, INSTITUTO DE GEOFÍSICA DE LA
UNAM

MÉXICO, D. F. Septiembre 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

Agradecimientos	5
Lista de figuras	8
Lista de tablas	11
Introducción	12
Capítulo 1	
La Geografía y su importancia en el estudio de las superficies planetarias	16
1.1. Terminología aplicada a los cuerpos planetarios	16
1.2. Geografía de otros planetas. Era espacial y las Ciencias Planetarias	20
Capítulo 2	
Antecedentes e hipótesis de la formación de los barrancos	24
2.1. Antecedentes. Características generales del Planeta Marte	24
2.2. Descripción de rasgos marcianos. Características generales de los barrancos marcianos. Ubicación, orientación, morfología	29
2.2.1. Barrancos en el Planeta Marte	33
2.2.2. Características generales de los barrancos	34
2.2.3. Características particulares de los barrancos	36
2.3. Agua y bióxido de carbono en Marte, ambiente actual	39
2.4. Teorías acerca del origen de los barrancos marcianos	44
Capítulo 3	
Teorías recientes y CO ₂	71
Capítulo 4	
Modelo físico de la formación de un barranco	79
4.1. Revisión preliminar de imágenes MOC (Mars Orbiter Camera). Ubicación de barrancos	79
4.1.2. Revisión complementaria de imágenes MOC THEMIS, HIRISE Y ESA	84

4.1.3	Características generales de los barrancos marcianos	92
4.2	Barrancos terrestres. Volcán Nevado de Toluca	95

Capítulo 5

	Modelo “Fluidización gaseosa del CO ₂ ”, experimentos y analogías con barrancos marcianos	104
5.1	Modelo propuesto “Fluidización gaseosa del CO ₂ ”	104
5.2	Experimentos. Formación de barrancos marcianos	108
5.2.1	Experimento 1. Con inyección de aire	108
5.2.2	Experimento 2. Con hielo seco (CO ₂)	112
5.3	Analogías entre barrancos experimentales y barrancos marcianos	116

Capítulo 6

	Discusión	123
6.1.	Objeciones a las hipótesis propuestas previamente	123
6.2.	Puntos favorables a la Teoría de fluidización del CO ₂ gaseoso	130
	Conclusiones	134
	Conclusiones generales	
	Conclusiones específicas	
	Referencias	137
	Apéndice 1	147
	Apéndice 2	151

Los geógrafos que se han involucrado con la Luna, Marte y otros planetas, en el futuro enfrentarán problemas nuevos y desafiantes pero de ninguna manera ajenos, en la interpretación del relieve (Richard J. Pike, 1974).

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer al Dr. Héctor Durand Manterola, Director de Tesis, por su paciencia, comentarios y por sugerir el tema de los barrancos marcianos, para la elaboración de esta tesis. Sin duda un trabajo muy interesante. La parte física fue gran complemento para esta tesis.

Dr. José Lugo Hubp, gracias por sus comentarios y sugerencias para mejorar este trabajo. Su experiencia me ayudó a comprender mejor los conceptos de geomorfología empleados en este trabajo.

Dr. Lorenzo Vázquez Selem, gracias por su paciencia y detallada revisión del manuscrito. Sus acertadas sugerencias y comentarios mejoraron drásticamente este trabajo. Y constituyeron un aprendizaje muy valioso para mí.

Le agradezco al Dr. Gustavo Tolson Jones ser parte del Comité Tutoral de este trabajo y la valiosa revisión y comentarios de gran experiencia que hizo al manuscrito.

Dra. Guadalupe Cordero gracias por su ayuda y apoyo durante todo este estudio. Su exhaustiva revisión y comentarios me permitieron modificar y entender claramente varias de las ideas plasmadas en el manuscrito.

Parte de este trabajo lo realicé en el extranjero, durante dos visitas de investigación a instituciones de gran prestigio. Una de ellas es *Smithsonian Institution-National Air Space Museum, Center for Earth and Planetary Studies*, de Washington D.C. U.S.A.

Agradezco infinitamente al Dr. James Zimelman por la gran oportunidad y facilidades proporcionadas para realizar la Estancia Doctoral así como por sus comentarios, el material y proporcionado y equipo utilizado durante mi visita.

Muchas gracias al Dr. Robert Craddock quien me asesoró en el trabajo de Tesis. Su experiencia, comentarios, recomendaciones y conversaciones fueron sumamente valiosos. Sus ideas incrementaron la calidad del trabajo. Gracias por su paciencia.

También doy las gracias al Dr. Ross Irwin y al Dr. Brent Warry por su apoyo y por la información proporcionada relacionada a varias imágenes del planeta Marte, utilizadas en este trabajo.

La visita a *Smithsonian Institution* constituyó una experiencia gratificante y exitosa.

La otra institución es *Lunar and Planetary Institution (LPI)/ USRA (Universities Space*

Research Association). Houston Texas, USA.

Gracias al Dr. Stephen Mackwell, Director de *Lunar and Planetary Institution* por aceptar mi estancia de investigación en este instituto. Hecho que redundó benéficamente esta etapa académica de mi vida.

La finalidad de esta estancia fue la publicación de un artículo científico la cual realicé bajo la valiosa dirección y vasta experiencia de los investigadores Dr. Allan Treiman, Dr. Stephen Clifford y Dr. Jeremie Lasau, quienes también son coautores de dicho artículo.

Estoy sumamente agradecida con el Dr. Allan Treiman por su valioso apoyo y paciencia en esta etapa final del presente trabajo. Su vasta experiencia, excelentes comentarios y sugerencias me ayudaron a concretar esta Tesis.

Muchas gracias al Dr. Stephen Clifford por su paciencia, interesantes conversaciones y asesoría.

Dr. Jeremie Lasau por su experiencia y valioso trabajo en las simulaciones del modelo propuesto en nuestro artículo científico.

También fue una visita científica bastante benéfica para mí al conocer y convivir con científicos tan experimentados del Lunar and Planetary Institute y NASA.

Agradezco a nuestra prestigiada Universidad Nacional Autónoma de México/UNAM por permitirme llegar a esta etapa académica que disfruto bastante.

Muchas gracias al Dr. Javier Delgado, Coordinador del Posgrado en Geografía e la UNAM por su gran apoyo en todo momento. El Posgrado me dio la oportunidad para participar tanto en los congresos internacionales, como para acceder a la oportunidad de realizar la estancia doctoral en Smithsonian Institution.

Asimismo le expreso un especial agradecimiento al Dr. José Luis Palacio Prieto quien ocupaba la dirección del Posgrado General de la UNAM cuando solicité la estancia doctoral, y que gentilmente me apoyó para realizarla.

Gracias al Instituto de Geofísica, y particularmente al Departamento de Física Espacial (ahora Ciencias Planetarias) por la oportunidad de realizar mis tres tesis de grado en su espacio.

Quisiera agradecer y mencionar a todos los investigadores, estudiantes y personal con

quien conviví durante el tiempo que escribí mis tres trabajos en el citado instituto, pero me resultaría imposible citar a todos los involucrados. Por lo que acepten mis disculpas al hacer un agradecimiento general.

Gracias al Dr. Armando Carrillo por su apoyo y asesoría en cuestiones de física y cómputo durante la larga etapa que pasé en el Departamento de Física Espacial. Sus enseñanzas aumentaron mi interés por la ciencia de la Física.

Asimismo agradezco al M. en C. Gilberto A. Casillas por el apoyo técnico en cómputo y asesoría en Física durante el tiempo de elaboración de las Tesis de Maestría y Doctorado. Su eficiencia fue de gran ayuda en los trabajos presentados en los congresos científicos.

Gracias a investigadores del Instituto de Geografía de la UNAM, por la orientación que dieron y al personal de la biblioteca por su amable trato.

Aprovecho la oportunidad para agradecer a la Dra. Oralia Oropeza del mismo instituto por su constante asistencia y consejos que me brindó.

Gracias a la Dra. Verónica Ontiveros (del Instituto de Geofísica/UNAM) por su apoyo durante mi estancia en Washington D.C./USA.

Doy las gracias a la Secretaría de Educación Pública por el apoyo que me brindó para realizar la estancia de investigación en Houston, Texas. Fue una experiencia que enriqueció mi trabajo académico y favoreció la terminación del mismo.

Este trabajo doctoral fue financiado por becas de, CONACyT, y del Posgrado General de la UNAM, en una primera etapa del trabajo y posteriormente por una beca-comisión de la Secretaría de Educación Pública.

Por último, me gustaría dar las gracias a mi familia, que apoyó mi trabajo académico.

Sin el apoyo de las personas e instituciones citadas no habría sido capaz de llegar a donde estoy.

Yolanda Cedillo

Lista de figuras

No.		Pág.
	Capítulo -1-	
1.1	Mapas de elevaciones del planeta Marte	12
	Capítulo -2-	
2.1	Periodos geológicos del planeta Marte	15
2.2	Ejemplo de barrancos marcianos	19
2.3	Barrancos en una ladera marciana	20
2.4	Evolución de la oblicuidad del planeta Marte	21
2.5	Mapa topográfico del planeta Marte	24
2.6	Barrancos con apariencia joven	25
2.7	Barrancos en varios ambientes geológicos	27
2.8	Diagrama de fases del CO ₂	32
2.9	Barrancos sobre una duna	35
2.10	Barrancos activos sobre una duna	36
2.11 a	Barrancos en Valle Kasei	37
2.11 b	Deslizamiento de terreno en Valle Kasei	38
2.12	Distribución geográfica de los barrancos marcianos	44
2.13	Avalancha de CO ₂	50
2.14	Material rocoso de los barrancos	52
2.15	Barrancos en un cráter de impacto	55
	Capítulo -3-	
3.1	Barrancos sobre dunas	60
3.2	Numerosos barrancos en ladera de un cráter de impacto	61
3.3	Barrancos con canales angostos	62
3.4	Barrancos en ladera exterior de un cráter de impacto	63
3.5	Barrancos angostos	63
3.6a	Barrancos en dos cráteres de impacto cercanos	64
3.6b	Barrancos en dos cráteres de impacto cercanos	64
3.7	Barrancos con acumulación de nieve de CO ₂	65
	Capítulo - 4-	
4.1 a	Mapa del Hemisferio Oriental de Marte	67
4.1 b	Mapa del Hemisferio Occidental de Marte	68

4.2	Sistemas de barrancos	70
4.3	Sistemas de barrancos	70
4.4	Sistemas de barrancos en el cráter Newton	71
4.5	Diferentes tipos de barrancos	79
4.6	Rasgos de un barrancos	80
4.7	Imagen del Volcán Nevado de Toluca. Área de estudio	83
4.8a	Vista de abanicos de detritos en el volcán Nevado de Toluca	85
4.8b	Vista de abanicos de detritos en el volcán Nevado de Toluca	85
4.9	Vista cercana de un abanico de detritos	86
4.10	Vista de abanicos de detritos en ladera exterior (volcán Nevado de Toluca)	86
4.11a	Barrancos en el interior del cráter del volcán Nevado de Toluca	87
4.11b	Barrancos en el interior del cráter del volcán Nevado de Toluca	87
4.12	Diagrama de longitudes de barrancos marcianos	88
4.13a	Ladera en el interior del cráter del volcán Nevado de Toluca (año 2006)	89
4.13b	Ladera en el interior del cráter del volcán Nevado de Toluca (año 2008)	89

Capítulo -5-

5.1a	Representación de la separación de granos de arena y efecto de fluidización	93
5.1b	Representación de la separación de granos de arena y efecto de fluidización	93
5.2	Etapas de la formación de un barranco, según modelo de la fluidización del CO ₂	94
5.3	Imagen. Morfología de un barranco	94
5.4	Experimento de formación de un barranco y fluidización del material seco	96
5.5	Experimento de formación de un barranco y fluidización del material seco	96
5.6	Fotografía de barrancos experimentales con diferente pendiente	98
5.7	Gráfica de las diferentes pendientes de los barrancos experimentales	98
5.8a	Experimento de formación de un barranco con material seco y CO ₂	100
5.8b	Barranco marciano con forma inusual	101
5.9	Comparación de barrancos experimentales con barrancos marcianos	105
5.10	Comparación de barrancos experimentales con	

	barrancos marcianos	106
5.11	Comparación de barrancos experimentales con barrancos marcianos	106
5.12	Comparación de barrancos experimentales con barrancos marcianos	107

Capítulo -6-

6.1	Barranco activo en cráter de impacto en Terra Sirenum	112
6.2	Dr. Ken Edgett uno de los descubridores de los barrancos marcianos	113
6.3	Líneas oscuras sobre una ladera. Deslizamiento de material?	114
6.4	Líneas oscuras sobre una ladera. Deslizamiento de material?	115
6.5	Movimiento de material seco sobre una ladera	115
6.6	Desplazamiento de material seco. Etapa temprana en la formación de barrancos?	115
6.7	Barrancos en un cráter de impacto en la Luna	119

Lista de tablas

1.1	Ciencias que derivan su nombre de nombres de los cuerpos del Sistema Solar	6
2.1	Características generales del planeta Marte	13
2.2	Principales hipótesis de la formación de los barrancos marcianos	56
4.1	Longitudes de barrancos	71
4.2	Lista de imágenes de la Misión MGS	73
4.3	Lista de imágenes HiRISE	77
5.1	Ángulos de inclinación en la formación de barrancos	99

Introducción

La exploración espacial del sistema solar ha puesto al descubierto una amplia diversidad de paisajes planetarios, algunos similares a los terrestres. Desde la segunda mitad del siglo XX, se han obtenido imágenes de la superficie de otros planetas, donde se reconoce que fenómenos como el vulcanismo, la erosión hídrica, la erosión eólica, los deslizamientos, entre otros procesos, han tenido lugar a lo largo de su historia geológica. Ello hace posible establecer comparaciones con la superficie terrestre, y en muchos casos suponer que los mismos procesos modelaron ambas, aunque también pudieron ocurrir procesos diferentes que comienzan a reconocerse.

La observación de esos otros paisajes planetarios hizo que, en algunos casos, los científicos y escritores hicieran analogías de dos planetas considerados por muchos años como planetas hermanos: Marte y la Tierra. Marte mostraba huellas de antiguas redes de drenaje, volcanes, dunas, entre otros rasgos semejantes al relieve terrestre, por lo que se concluía que los mismos procesos eran compartidos.

Sin embargo, cuando se estudió más profundamente Marte, comenzaron a notarse las diferencias que existían entre ambos cuerpos, en cuanto a la composición atmosférica, el campo magnético, la diferenciación de las capas estructurales y el relieve, por lo que se concluyó que realmente los dos planetas habían evolucionado de manera diferente.

Las formas del relieve, aunque similares, pudieron surgir por procesos diferentes, debido a que la historia geológica en ambos planetas presenta diferencias importantes. Hasta ahora se acepta que la superficie marciana tuvo cuerpos de agua, lagos y hasta un océano, en un pasado muy remoto (hace unos 3.5×10^9 de años) cuando su atmósfera era lo suficientemente densa como para haber creado un efecto de invernadero, pero debido a que su atmósfera se volvió muy tenue, el líquido se evaporó y el planeta se volvió desértico y frío, permaneciendo de esta manera durante la mayor parte de su historia geológica. El

relieve presenta huellas de un pasado fluvial y de gran actividad volcánica, tal como lo muestran las redes de valles y las grandes elevaciones. Muchas otras formas de relieve se aprecian en su superficie.

Unas de estas formas son los barrancos semejantes en muchos casos a los terrestres. En Marte presentan varios enigmas hasta ahora no resueltos, por ejemplo, su edad, su origen y los procesos que intervinieron en su formación.

Los barrancos terrestres pueden formarse en lapsos muy cortos, de días, dependiendo de varios factores (climáticos, litológicos, topográficos), y el detonador principal es la lluvia. En cambio algunos barrancos marcianos, al parecer han experimentado numerosas etapas de formación y hasta ahora resulta dudoso si los formó algún líquido. Esto es porque las condiciones físicas recientes (en el contexto geológico) del planeta Marte, difieren bastante de las terrestres y no es posible que en su superficie exista actualmente agua en estado líquido.

Con el fin de resolver los enigmas que presentan los barrancos marcianos (reconocidos en las imágenes enviadas a la Tierra por las naves espaciales), desde el año 2000 se han propuesto principalmente tres hipótesis acerca de su formación:

- 1) *por agua en estado líquido*
- 2) *por bióxido de carbono en estado gaseoso*
- 3) *por avalancha de material en estado seco.*

Actualmente se carece de suficientes datos que conduzcan a un resultado confiable respecto a su origen. Se han elaborado algunas teorías que se basan en el ambiente marciano y se complementan con la comparación de los barrancos terrestres.

De las tres anteriores se han derivado otras con algunas variaciones, pero en la mayoría se realizó básicamente una estadística de los barrancos, lo que incluye longitud, profundidad (medida a partir de la superficie circundante) y, en algunos casos, se propuso también un modelo de la formación de los mismos. Hasta ahora todas las teorías propuestas presentan inconsistencias, un reto para elaborar otras propuestas y poder contribuir a resolver el enigma de los barrancos marcianos.

En esta investigación doctoral, se propone una nueva teoría que pretende aportar una solución alterna a la formación de estos barrancos. Este trabajo comprendió la revisión de imágenes de la superficie marciana, análisis de datos, trabajo experimental y trabajo de campo (terrestre).

Uno de los objetivos de esta tesis es comparar los barrancos marcianos con los terrestres. Pero una comparación casi total de las regiones conocidas con barrancos, requeriría un tiempo de investigación muy extenso, de manera que sólo se eligieron algunas zonas con barrancos marcianos representantes de la variedad de terrenos donde se ubican.

El trabajo de campo se realizó en el volcán Nevado de Toluca por presentar un ambiente de clima frío y porque algunos barrancos son similares a los barrancos marcianos; aunque obviamente no se tienen las condiciones atmosféricas marcianas, fue posible establecer comparaciones importantes entre ambas formas de relieve.

Esta tesis está integrada por 6 capítulos. Debido a que el tema central pertenece al campo de las ciencias planetarias y es el primer trabajo elaborado dentro del campo de la Geografía, al inicio se destaca la importancia de aplicar la Geografía al estudio de otros planetas, particularmente en su superficie.

El primer capítulo se enfoca a la importancia que tiene el estudio de otras superficies planetarias desde el punto de vista geográfico y no solamente astronómico.

En el capítulo 2 se describen las características generales del planeta Marte y se citan las teorías previas propuestas para explicar el origen de los barrancos marcianos.

La parte central el capítulo 3 comprende una actualización del tema tratado. Se destaca la importancia del CO₂ en la formación de los barrancos marcianos que se reporta en teorías recientes. El capítulo 4 incluye el material utilizado durante el desarrollo de la tesis, que comprende las imágenes de la superficie de Marte tomadas por tres sondas espaciales de la Agencia Espacial Norteamericana, (NASA), y algunas más de la Agencia Espacial Europea, (ESA). Parte de las imágenes utilizadas están disponibles en Internet (en páginas de la NASA), y otras

fueron proporcionadas por la Smithsonian Institution durante la estancia doctoral que realicé en National Air and Space Museum, Center for Earth and Planetary Studies en Washington, D.C. Asimismo, esta parte de la tesis comprende el desarrollo del trabajo de campo.

En el capítulo 5 se presenta el modelo propuesto de *Fluidización gaseosa del CO₂* para la formación de los barrancos y los experimentos realizados.

La actualización de este trabajo se elaboró con análisis del material utilizado durante una visita de investigación con duración de 6 meses, que la autora realizó al Lunar Planetary Institute (Universities Space Research Association/NASA) en Houston, Texas. En esta etapa, la autora realizó y publicó un artículo científico bajo la conducción de investigadores del mismo instituto.

Finalmente, se presentan la discusión y las conclusiones del trabajo.

Capítulo 1. La Geografía y su importancia en el estudio de las superficies planetarias.

1.1. Terminología aplicada a los cuerpos planetarios.

Este trabajo constituye un nuevo enfoque dentro de la geografía en México, la cual ha tratado sólo con el planeta Tierra.

En otros países las superficies planetarias se estudian desde hace varias décadas. Se considera necesario citar algunos antecedentes que la Geografía tiene en el estudio de otros planetas. Con ello, se pretende esclarecer el rol que tiene la Geografía dentro de las ciencias planetarias.

Desde la antigüedad, el estudio de los cuerpos celestes (planetas y estrellas) estaba relacionado exclusivamente con la Astronomía. A medida que se realizaron observaciones con telescopio y se descubrieron más planetas, algunos con numerosos satélites orbitándolos, surgieron otros términos para designar a las ciencias que comprendían el estudio de esos cuerpos cósmicos.

A mediados del siglo 19, la *Areología* (por *Ares*, el dios griego de la guerra) (fuente: <http://books.google.com.mx/books?id=1XKXQqUGDnoC&pg=PA48&lpg=PA48&dq=areologia+dios++griego&source=bl&ots=dI3k08lZ33&sig=YO66fpYa3S4VJW-EkyslzAp2JA8&hl=es&sa=X&ei=PP4qUMDyloO29QSQ94CgBA&ved=0CEIQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false>) era la ciencia aplicada al estudio del planeta Marte y de igual manera existía la *Selenología*, para el estudio de la composición y evolución de la Luna; esta ciencia fue considerada como rama de la Astronomía y como sinónimo de Geología Lunar. También existía la *Aerografía* y la *Selenografía*, ambas sinónimos de Geografía de Marte y Geografía de la Luna. (fuentes: http://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa_de_Marte#Nomenclatura_moderna, <http://www.astromia.com/glosario/selenografia.htm>, <http://www.babylon.com/definition/Selenograf%C3%ADa/Spanish>).

Asimismo otras ciencias comprendían el estudio del Sol y los demás planetas del Sistema Solar (tabla 1). Sus nombres refieren a divinidades griegas

(fuente: <http://www.astromia.com/glosario/selenografia.htm>).

Tabla 1. Ciencias que derivan su nombre de nombres de los cuerpos del Sistema Solar.

Cuerpo celeste	Término
Sol	Heliología
Mercurio	Hermeología
Venus	Cytherología
Tierra	Geografía, Geología
Luna	Selenología
Marte	Areología
Júpiter	Zenología
Saturno	Kronología
Urano	Uranología
Neptuno	Poseidología
Pluton	Hadeología

Con el tiempo estos vocablos fueron cayendo en desuso debido a que se complicó su aplicación. Cuando se inició la era espacial, mediados del siglo 20, todavía se utilizaban algunos de estos términos pero también surgieron otros como Astronomía Planetaria, Planetología, Ciencias Espaciales y Ciencias Planetarias, entre otros. Este último es el más utilizado actualmente. También en las ciencias planetarias se incluyen los exoplanetas, es decir, los que no pertenecen a nuestro sistema solar.

Vocablos que eran exclusivos para designar procesos evolutivos terrestres se comenzaron a aplicar a otros planetas y satélites. Entonces se fueron aceptando internacionalmente frases como: *aterrizar en La Luna* o *aterrizar en otros planetas*, es decir, fue necesario estandarizar la terminología.

En la década de los 60's el dilema del uso de la terminología para otros planetas se resolvió (Pike, 1974) y se hizo "común" describir la *Geología de la Luna* o *Geología de Marte*, no obstante que el prefijo **Geo** signifique Tierra y se haya aplicado exclusivamente a este planeta.

Pike (1974) consideró que la misma lógica puede utilizarse también para la Geografía y que términos como "selenografía" y "aerografía" no son necesarios ni

deseables, y que la aplicación de *geografía lunar* y *geografía marciana* son suficientes para describir a las regiones de otras superficies planetarias. Enfatiza además que quizá la palabra “geografía” es suficiente para aplicarse a otros mundos pues, “desde una perspectiva cósmica, la Tierra es, sin duda, uno de los numerosos planetas sólidos”.

Así, en el ámbito internacional se dio inicio al uso de estos términos en el estudio de otros planetas, incluyendo a la Geografía, sin que su uso se restrinja a la Tierra, debido al prefijo geo.

Pike (1987) menciona que debido a que se desarrolló la exploración de otros cuerpos planetarios desde mediados del siglo XX, la *Geografía extraterrestre* se convirtió en una realidad. En 1974, una definición de geografía se expandió conceptualmente para dar cabida a los planetas que se exploraban por esas décadas, principalmente Marte y la Luna, el satélite de la Tierra.

Sin embargo, el uso de la Geografía aplicada a otros planetas no tuvo amplia difusión. Esto se reflejó durante el Congreso Internacional de Geografía, en el año 1972, pues los profesionales no respondieron con gran entusiasmo y se enviaron pocos artículos acerca de asuntos extraterrestres, a pesar de haber sido convocado este material. Esta actitud, señala Pike (1974), “sugiere que los geógrafos están preparados para abandonar completamente la investigación de las superficies lunar y marciana a los astrónomos, geólogos y geofísicos”. Como la Tierra es considerada el medio ambiente del hombre y debido a que aún no se han establecido los humanos permanentemente sobre otras superficies extraterrestres, no era aceptable considerar “la Geografía de la Luna o la Geografía de Marte”.

Pero Pike (1974) señaló que lo anterior era un *veredicto prematuro*. Era un hecho que con el desarrollo de la era espacial, los geógrafos enfrentaban una oportunidad sin paralelo para extender el alcance de su campo, aunque como *geografía extraterrestre* estuviera restringida necesariamente a aspectos físicos de la disciplina. Dicho autor destacó que: “los geógrafos deberían evaluar el desafío planteado por las imágenes disponibles de Marte y la Luna; y deberían comenzar a pensar a partir de la investigación de los problemas, que revelan esas nuevas

superficies”.

Otro autor que también hace mención de la importancia de aplicar la geomorfología en otras superficies planetarias es Baker (1993) quien refiere que imágenes multiespectrales de la Tierra, tomadas por los satélites en las primeras etapas de la era espacial, probaron tener inmensa importancia geomorfológica ofreciendo una perspectiva planetaria de la Tierra.

El número de superficies planetarias disponibles a la investigación detallada se triplicó durante la década de los 70, de tal modo que las ciencias de la Tierra cambiaron para siempre (Pike, 1974). Y el campo de los estudios planetarios se extendió a otras áreas como la geografía y geomorfología.

Baker (1993) estima que es importante recordar que la Tierra tiene sus propias formas de relieve de origen extraterrestre como los cráteres de impacto. Este hecho hace que consideremos a la Tierra como otra superficie planetaria entre las que conforman el Sistema Solar. Por ello, más adelante señala Pike (1987) que “es tiempo de evaluar la increíble colección de observaciones planetarias y considerar la construcción de una perspectiva extraterrestre para la geografía”.

Las ciencias planetarias y la geografía comparten varios métodos comunes; dos muy conocidos son el sentido de exploración y la cartografía (Pike, 1987). La Tierra es el primer paisaje en donde los científicos fueron exploradores y hasta ahora relativamente pocos aventureros en el espacio son humanos. A excepción de las 9 expediciones Apolo a la Luna, (de las cuales 6 llegaron a la superficie), las observaciones de planetas y satélites las han realizado robots.

La mayoría de las observaciones de las formas de relieve planetarias son hechas desde órbita por naves espaciales que sobrevuelan sus superficies (Pike, 1974; 1987), y que llevan instrumentos que permiten utilizar tecnologías cada vez más complejas para mejorar las investigaciones. Las superficies se estudian a escalas de miles de kilómetros a metros mediante sensores remotos. El caso contrario sucedió en la Tierra. Las primeras investigaciones se hicieron en escalas de metros a miles de kilómetros y se resolvieron problemas complejos, aparentemente sin relación, a partir de la experiencia observacional basada en

muestras aisladas y dispersas del planeta. Con las limitaciones técnicas existentes no era posible ampliar las exploraciones en la Tierra.

Los geógrafos ya se ocuparon de la interpretación del relieve terrestre y encontraron que el paso a la investigación de la superficie extraterrestre es una extensión de la estructura y énfasis conceptual; sólo el objeto es diferente (Pike, 1974).

1.2 Geografía de otros planetas. Era espacial y las Ciencias Planetarias.

Con el desarrollo de la era espacial, principalmente desde hace tres décadas de exploración, se descubrió que otros planetas con cortezas rocosas, y varios de sus satélites experimentaron procesos evolutivos similares a los de la Tierra, por lo que se les designó *planetas terrestres*. Sus superficies exhibieron diversas formas de relieve y composición química, que en algunos casos reflejan antiguos eventos de magnitud mayor a los de nuestro planeta.

En otras superficies planetarias existen procesos dinámicos observables en tiempos relativamente cortos, de años, como volcanismo activo (Io), géiseres de nitrógeno (Tritón), lagos de metano (Titán), tormentas de arena (Marte), avalanchas de CO₂ (Marte) y nubes (Marte, Titán, Tierra, Venus), entre muchos más.

El relieve planetario resultante de los procesos citados se estudia mediante diversas ciencias, entre ellas la Geografía, pero más en particular a través de la Geomorfología la cual nos permite la comparación con los procesos que nos son más familiares: los terrestres.

En base a lo anterior y dado que la *Geografía*, particularmente la *Geografía Física*, comprende el estudio de la Tierra como un sistema complejo en donde tienen lugar numerosos fenómenos, consideramos admisible el aplicar la *Geografía en otros planetas*.

La Geografía Física ha ampliado su campo de estudio porque es aplicada a otras superficies planetarias, por ejemplo, mediante la cartografía, ya que se requiere de representar la topografía por medio de mapas. También se aplica para

denominar y caracterizar el relieve, ubicar áreas de estudio, investigar las interacciones entre las superficies y atmósferas en los casos pertinentes, etc. Como parte de la Geografía Física, la Geomorfología también tiene relevancia en investigaciones del relieve planetario; por ejemplo, los estudios de antiguas costas en las que se reconoció la existencia de formas lacustres o marinas marcianas, asociadas a lagos u océanos, lo cual tiene implicaciones en el clima del planeta (Parker y Currey, 2001). La geomorfología también ofrece un campo más amplio para conocer los procesos que pudieron intervenir en el modelado del relieve. Algunos estudios realizados por Baker (2003), han mostrado que algunas formas pudieron haberse generado por procesos asociados a agua líquida, en el pasado geológico de Marte, tales como antiguas redes de drenaje (Baker et al, 1991) y enormes inundaciones (Baker y Milton, 1974). El estudio de dichas superficies permite comparar, inferir y conocer parte de su historia geológica, por lo que al igual que otras ciencias planetarias, la misma Geografía se extiende al ámbito planetario.

Reiterando, la Geografía Física a nivel internacional comprende también el estudio de otros mundos. Prueba de ello son las publicaciones científicas cuyos autores son geógrafos y /o investigadores de otras ciencias que pertenecen a alguna institución geográfica. También en la literatura científica y diccionarios de uso reciente puede verse que se utilizan términos como *Geografía de Marte* o *Geografía extraterrestre*. Algunas referencias son las siguientes: (Fuentes: http://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa_de_Marte#Nomenclatura_moderna, <http://www.geography.org.uk/events/annualconference/derby2005/>; (Pike, 1974; 1987), (Baker, 1984); (Cosgrove, 2000), (Parker y Currey, 2001); (Hargitai, 2002), (Shingareva et al, 2005) y (Peckyno, 2006). Como se citó antes, un sinónimo de la Geografía de Marte, es la Aerografía y está enfocada a lo que se denomina Geografía Física, o sea, la distribución de los rasgos físicos y su representación cartográfica (Fuente: <http://www.lpi.usra.edu/education/K12/gangis/marsdatum.html>).

La metodología fundamental geográfica, señala Pike (1974), no cambia de región a región sobre la Tierra. La investigación de un cuerpo extraterrestre no requiere toda una nueva filosofía geográfica, o de otras herramientas

operacionales, ni nueva nomenclatura. La geografía permanece como geografía, sobre Marte, la Luna o la Tierra. Únicamente la región o cuerpo planetario son nuevos. De hecho los procesos que formaron las superficies de la Luna y Marte no son necesariamente nuevos o misteriosos, tal es el caso de la Luna en donde se encontraron rocas de silicatos similares a las terrestres. La Geografía puede encontrar muchos problemas extraterrestres, familiares a la experiencia terrestre, lo que será diferente en muchos casos es la duración e intensidad de los procesos específicos que operaron en otros planetas (Pike, 1974).

Por otro lado, el enfoque de la Geografía hacia el estudio de otros planetas tendrá relevancia en la Geografía nacional, porque será un área de investigación alternativa.

El hacer estudios comparativos de regiones en nuestro territorio con regiones de otra superficie planetaria, permitirá proponer modelos que nos conduzcan a conocer y entender los procesos involucrados en la evolución de otros planetas.

Se espera que este trabajo abra nuevas opciones de estudios planetarios dentro del ámbito geográfico, ya que estamos viviendo un reconocimiento preliminar del Sistema Solar.

Finalmente, cabe destacar una característica muy importante del planeta Marte respecto a su relieve: como este planeta no tiene océanos, no existe la referencia de nivel del mar. Entonces el punto cero de la elevación o datum para Marte se definió en términos de la altitud a la cual el aire tiene una presión particular de casi 6,1 milibares.

(Fuente: <http://www.lpi.usra.edu/education/K12/gangis/marsdatum.html>)

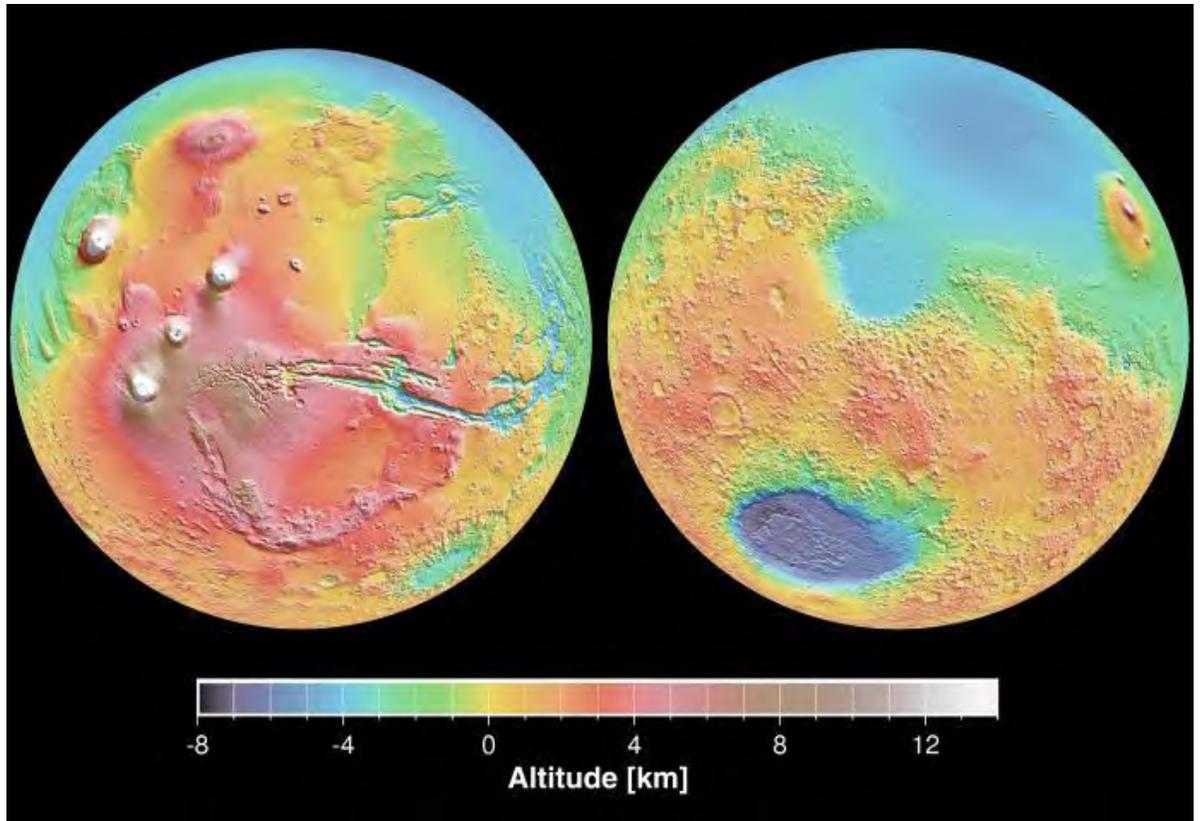


Figura 1.1 Mapas de elevaciones del planeta Marte.

Estos mapas muestran la altitud caracterizada en colores - azul representa el relieve bajo y en rojo / blanco el relieve con máxima altitud. Los dos hemisferios se centran en la meseta de Tharsis (incluyendo el Valle Marineris y los grandes volcanes) y en la cuenca de impacto Isidis (con la cuenca Hellas al sur).

Los mapas se elaboraron con el Altimetro Láser Orbital de Marte (MOLA, por sus siglas en inglés), instrumento a bordo de la sonda Observador Marciano (NASA).

(Fuente: http://www.lpi.usra.edu/science/treiman/greatdesert/workshop/marsmaps2/marsmaps2_imgs/mola_color1.jpg)

Capítulo 2. Antecedentes e hipótesis de la formación de los barrancos.

2.1. Antecedentes. Características generales del Planeta Marte.

Existen diversos trabajos enfocados a rasgos singulares de las superficies planetarias, las del planeta Marte en particular, en los cuales se estudia la geomorfología de las calderas volcánicas, la geomorfología costera y los barrancos. En los estudios de geomorfología costera extraterrestre realizados por Parker y Currey (2001), se reconoció la existencia de formas lacustres o marinas marcianas, que asociadas a lagos u océanos, tienen implicaciones sobre el clima del planeta. Asimismo, Fairén y coautores (2003) reconocieron que en la remota antigüedad, el agua líquida modeló el paisaje produciendo los sistemas de canales presentes en las laderas de los valles del noroeste y en las planicies del norte. Las características generales del planeta Marte y de la Tierra se distinguen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Algunos datos generales del planeta Marte (Kennet y Christiansen, 1995).

Características básicas	Marte	Tierra
Distancia media desde el Sol	1.53 U.A.(unidad astronómica)	1 U.A
Periodo de rotación	24 h 37 m (conocido como Sol)	23 h.56m.
Periodo de revolución	687 días	365.26 días
Diámetro ecuatorial	6, 786 km	12,750 km
Masa	0.108	1
Volumen	0.15	1
Densidad media	3.93 g/cm ³	5.52 g/cm ³
Oblicuidad	25.19°	23.45°
Excentricidad	.093	0.017
Composición de la atmósfera	95.3% bióxido de carbono, 2.7% nitrógeno, 1.6 % argón, 0.13% de oxígeno y 0.387% otros gases.	nitrógeno, el oxígeno y el argón, constituyen el 99,95 % del volumen atmosférico
Temperatura superficial	150-300 K	282 K (media)
Presión superficial	6-10 mb	1 atm=1.013.25 mb
Gravedad superficial	3.71 m/s ²	9.78 m/s ²
Épocas geológicas	Divididas en tres periodos: Noachiano, Hesperiano y Amazoniano.. ¹	Azoica, Arcaica, Proterozoica, Paleozoica, Mezozica y Cenozoica

¹ Se utilizan estos términos por su uso común.

La escala de tiempo geológico está determinada por el periodo Noachiano, que comprende ~4.5 a ~3.7 billones de años, el periodo Hesperiano desde ~3.0 a ~3.7 billones de años y el periodo Amazoniano iniciado hace ~3.7 billones de años hasta el presente (Head *et. al*, 2005).

El planeta Marte ha sido explorado durante más de tres décadas por al menos 40 naves, la mayoría han sido orbitadoras y norteamericanas (Fuente: Missions to Mars, LPI, 2011) como la Mariner 9, los Vikingos 1 y 2, los Pioneros 1 y 2, (Malin y Edgett, 2000), aunque algunas de estas naves estaban destinadas exclusivamente a la investigación de este planeta, otras tenían un objetivo planetario distinto pero su paso por Marte fue aprovechado para recabar información adicional valiosa.

Las misiones más recientes enviadas al planeta Marte son: Pathfinder (1997), Mars Global Surveyor MGS, (1997) Mars Odyssey, (2004) Spirit y Opportunity (2004); Mars Reconnaissance (2005); Phoenix (2007), y Curiosity (2012) de NASA, y Mars Express (2003) de la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés). Algunas orbitan el planeta y otras recorren su superficie.

Se investiga Marte desde satélites orbitales utilizando instrumentos que trabajan en varias longitudes de onda: radio, infrarrojo térmico, infrarrojo cercano, luz visible, rayos X y rayos gamma (Kargel, 2004).

Eras geológicas del planeta Marte

La historia geológica de Marte se clasificó en tres eras o períodos: Noachiano, Hesperiano y Amazoniano, (del más antiguo al más reciente) según la edad de las superficies correspondientes a los siguientes terrenos: Noachis Terra, Hesperia Planum, Amazonis Planitia. Estos terrenos se definieron con base a la densidad de cráteres, por Tanaka (1986).

Posteriormente Bibring y colaboradores (2006), propusieron una nueva clasificación para la historia geológica de acuerdo con la mineralogía marciana. Utilizaron datos del mapa producido por instrumento OMEGA (Espectrómetro de Mapeo Mineralógico en los rangos Visible e Infrarrojo) a bordo del orbitador Mars Express (ESA) lo que permitió identificar minerales por sus espectros. Propusieron

tres eras geológicas: Phyllosiana, Theiikiana y Siderikiana, que varían en la escala de tiempo propuesta por Tanaka (1986). (Figura1).

(Fuente: <http://geneura.ugr.es/~jmerelo/atalaya/print.cgi?id=/historias/39286&nombre=javarm>)
Sin embargo se utiliza más la propuesta de Tanaka.

La figura 1 muestra de la duración de los tres periodos geológicos marcianos: Noachiano, Hesperiano y Amazoniano según Tanaka, (1986) y la propuesta alternativa de Bribing y colaboradores (2006).

[nota: Según Carr y Head (2010), se sabe poco del periodo pre-noachiano excepto que se caracterizó por un la existencia de un campo magnético]

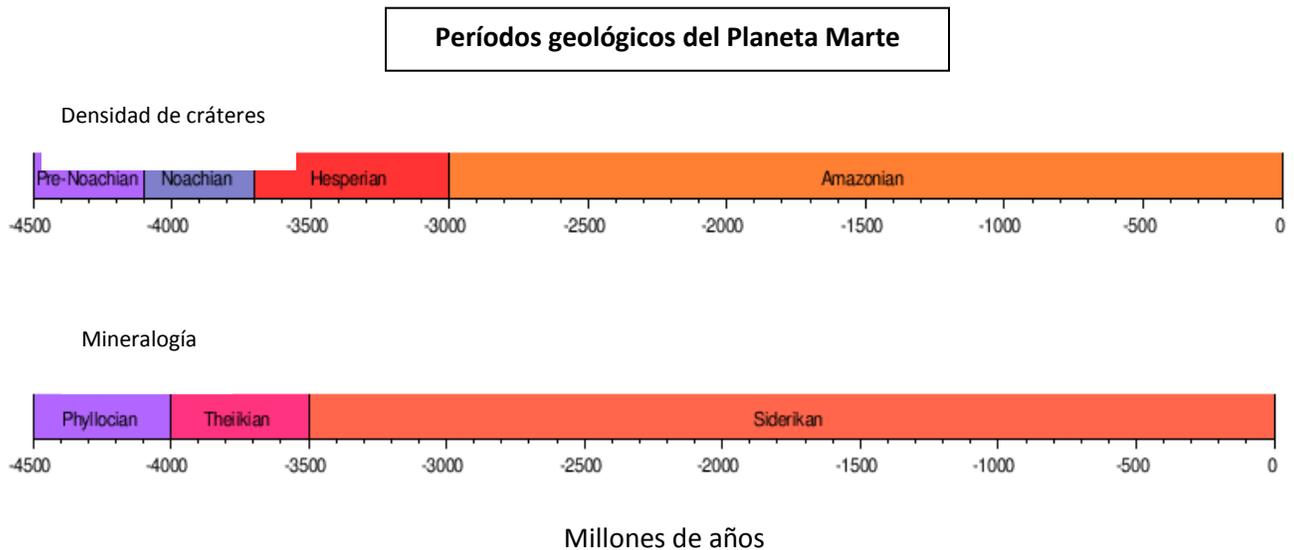


Figura 2.1 Periodos Geológicos del Planeta Marte.

Fuente:http://palaeos.com/precambrian/martian_timescale.html

La figura ilustra de la duración de los tres periodos geológicos marcianos: Noachiano, Hesperiano y Amazoniano establecida por Tanaka, (1986) con base a la densidad de cráteres localizados en los terrenos Noachis Terra, Hesperia Planum, Amazonis Planitia, de los cuales se derivaron los nombres de estos periodos. Una propuesta posterior fue la de Bribing y colaboradores (2006) también con tres periodos geológicos pero basados en la mineralogía de la superficie marciana y con datos obtenidos por el orbitador Mars Express de la Agencia Espacial Europea (ESA). Una diferencia entre ambas clasificaciones es la duración de los periodos geológicos.

Uno de los descubrimientos más recientes (década de los 90, aunque ya se

había inferido anteriormente), es la evidencia de que en el pasado geológico existió agua en estado líquido sobre el planeta Marte. Los rasgos particulares presentes en la superficie corresponden al modelado de dicho líquido, por lo que su estudio proporciona conocer mucho de la historia del relieve marciano.

Aunque es ampliamente aceptada la idea de que numerosos rasgos particulares en la superficie marciana corresponden al modelado por agua líquida (Christensen, 2003; Heldmann y Mellon, 2004; Lanza y Gilmore, 2006), es conveniente hacer una revisión de la cantidad de agua que ha existido en el pasado, además de considerar que otros fenómenos pudieron haber intervenido en el modelado del relieve. Por ejemplo, la acción del CO₂ (ya sea en estado líquido o gaseoso) y la erosión eólica son fenómenos que pueden estar actuando a partir de etapas geológicamente recientes ya que en las condiciones, ambientales actuales, con temperaturas en un rango de -153° C hasta 20° C (Fuente: <http://quest.nasa.gov/aero/planetary/mars.html>) y presión atmosférica de 7.3 y 10.8 milibares (la terrestre es mayor a 1000 milibares), registrada por la nave Vikingo 2 (NASA), el agua no puede existir en estado líquido sobre la superficie.

(Fuente: <http://www.solarviews.com/eng/mars.htm>)

Respecto a las temperaturas cerca del Ecuador marciano se registran 22°C (72°F) en el verano y en el polo sur -125°C (-255°F) en el invierno. (Fuente: <http://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/marslife/>)

Aunque el relieve del planeta Marte muestra formas semejantes al terrestre, su historia geológica, hasta donde se sabe, ha sido diferente a la de la Tierra. Al parecer, en la etapa más antigua de su formación hubo gran actividad tectónica y volcánica.

En el periodo Noachiano, hubo agua en estado líquido sobre su superficie evidenciando la existencia de una atmósfera más densa (según Ciencia@Nasa 2000).

Se ha estimado que en el periodo Hesperiano tardío Marte tuvo agua que equivaldría a la contenida en un océano con ~0.5-1 km de profundidad. Y que posteriormente gran parte de ésta fue almacenada bajo la superficie, como hielo y agua subterránea (Clifford et.al 2010).

Las formas de relieve como los canales de flujo sugieren la existencia de un cuerpo de agua en su pasado geológico. Actualmente parte del agua se encuentra almacenada en forma de hielo en las capas polares que equivaldría a una capa global de ~10 m de profundidad (Clifford 1992). El resto del agua existe también como permafrost en el subsuelo y como gas en la atmósfera.

En el presente Marte es un planeta frío y árido, con gran cantidad de paisajes glaciales.

Las temperaturas medias anuales oscilan de 218 K en el ecuador a 154 K en los polos con variaciones locales (Clifford *et al* 2010).

Por otra parte, la temperatura en la superficie de Marte varía a lo largo del día de forma más abrupta que en la Tierra. En los sitios de aterrizaje de una de las naves Vikingo, los instrumentos registraron temperaturas máximas de -17° C en el aire y +27° C en el suelo en días soleados de verano. Después del atardecer, las lecturas bajaron a -60°C, según Ciencia@Nasa (2000).

Las observaciones espectrales muestran que las capas polares están compuestas por hielo de agua, CO₂ sólido y polvo y durante el verano la cubierta de nieve estacional disminuye quedando expuesto el relieve polar que forma un patrón en espiral (Clifford *et al* 2000).

Algunos autores han buscado evidencia de acción hídrica en la superficie marciana. Por ejemplo, Gulick (2001) examinó la geomorfología de la red de valles marcianos desde la perspectiva hidrológica, y consideró que intervinieron fenómenos simultáneos originados por lluvia, flujo de calor global mayor al actual, en la historia temprana de Marte y algunos sistemas hidrotermales. La comparación de la morfología y de la distribución espacial de valles marcianos con las de los valles fluviales terrestres, sugiere que la mayoría de los primeros probablemente no se hayan formado por lluvia o por un flujo mayor de calor global antiguo. En general, los valles no están distribuidos uniformemente dentro de la superficie geológica como lo están los valles fluviales terrestres (Gulick, 2001).

La distribución aislada o agrupada de valles sugiere que las fuentes de agua localizadas han sido importantes en el desarrollo del drenaje.

Los estudios de carácter hidrológico en Marte se han llevado a cabo desde la

época de las misiones Marinero 9 y Vikingo (Cabrol y Grin, 2001), y se han generado diversos modelos para tratar de explicar el origen de la red hídrica. La erosión por agua es la que mejor explica la existencia de estos valles con profundidades de 500 a 2000 m. Algunos autores (Masursky *et al.*, 1977; Irwin III *et al.*, 2005; Craddock y Howard, 2002), sugirieron que los valles fluviales se formaron por precipitación durante el periodo Noachiano hace casi 3.8 mil millones de años. También Stepinski (2003) calculó la densidad de drenaje para la red fluvial marciana del Noachiano encontrando valores menores a los terrestres, indicando que la cantidad de agua líquida que pudo existir en el pasado de Marte fue mucho menor a la existente en la Tierra.

Se ha pensado que el agua debe haber estado bajo la superficie en forma de hielo y no como corrientes en la superficie. Al respecto, se citará más adelante la cantidad de agua en forma líquida que pudo existir en la superficie.

2.2. Descripción de rasgos marcianos. Características generales de los barrancos marcianos. Ubicación, orientación, morfología.

Los barrancos marcianos son rasgos geomorfológicos que están constituidos principalmente por tres características: cabecera, canal y abanico de detritos o zona de depósito (Malin y Edgett, 2000). Esta morfología es similar a muchos barrancos terrestres. Existen variantes de estos rasgos. Algunos barrancos se han formado como agrupaciones, en algunos casos no muestran las tres características mencionadas.

La parte alta donde comienzan a formarse los barrancos es ancha y los canales se van estrechando ladera abajo. Muchas laderas tienen canales distributarios, como se ve en la figura 2.2.

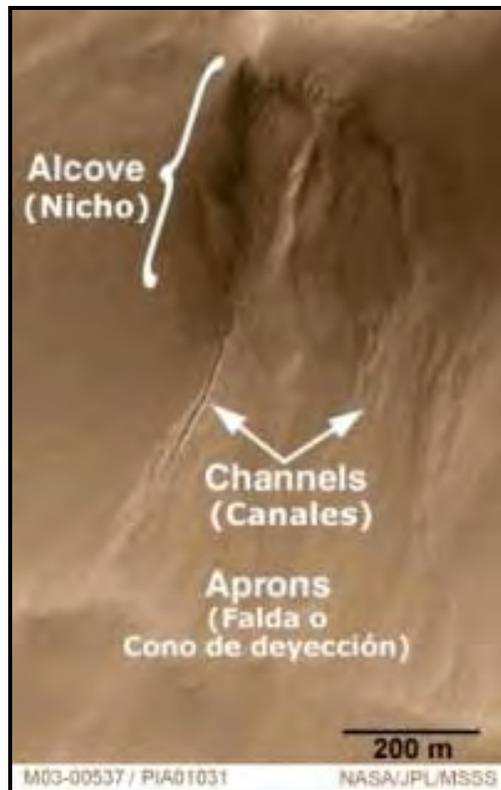


Figura 2.2. Ejemplo de barrancos marcianos.

Se muestran los tres principales rasgos geomórficos, cabecera (nicho), canal y abanico de detritos. Imagen de la Cámara Orbital de Marte (MOC Mars Orbiter Camera) M03-00537. Esta zona está localizada cerca de los 54.8°S y 342.5° W.

Tomada de Malin y Edgett, (2000).

En muchos casos, se han observado barrancos agrupados que se forman a unos cientos de metros de profundidad del terreno circundante, como se observa en la figura 2.3. Esta característica ha sido muy relevante en algunos modelos que intentan explicar el origen de los barrancos, como se verá más adelante.

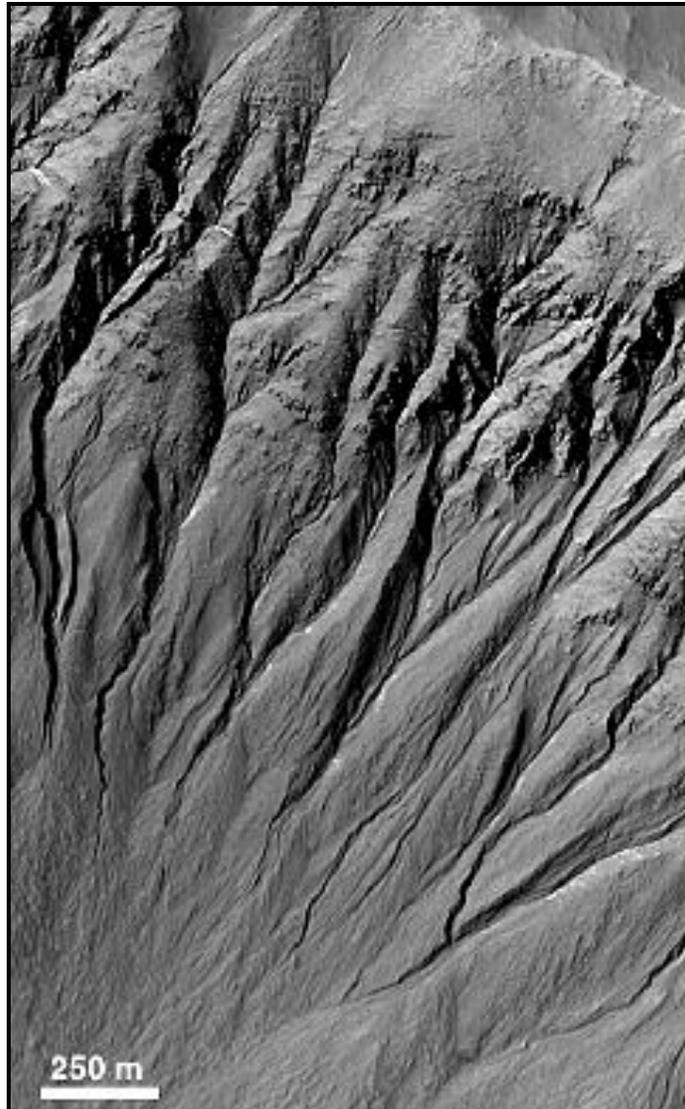


Figura 2.3. Barrancos en una ladera con canales distributarios cerca de los 37.3°S, 168.0°W. La ladera está iluminada desde la parte superior izquierda. Imagen MOC M07-01873. Tomada de Malin y Edgett (2000).

Es importante considerar aspectos particulares del planeta Marte antes de exponer las diferentes teorías acerca de la formación de los barrancos. En las teorías estarán integrados los procesos endógenos y exógenos que tienen influencia en la geomorfología marciana. En general, se considera que la oblicuidad del planeta, que actualmente es de 25.19 ° (Levrard *et al.*, 2004), está asociada a la evolución de la atmósfera y por tanto al clima; también es significativa en la distribución de elementos como el agua y el CO₂, los cuales se

proponen como agentes que intervienen en el modelado del relieve. Los ciclos de la oblicuidad del planeta Marte se observan en la figura 2.4.

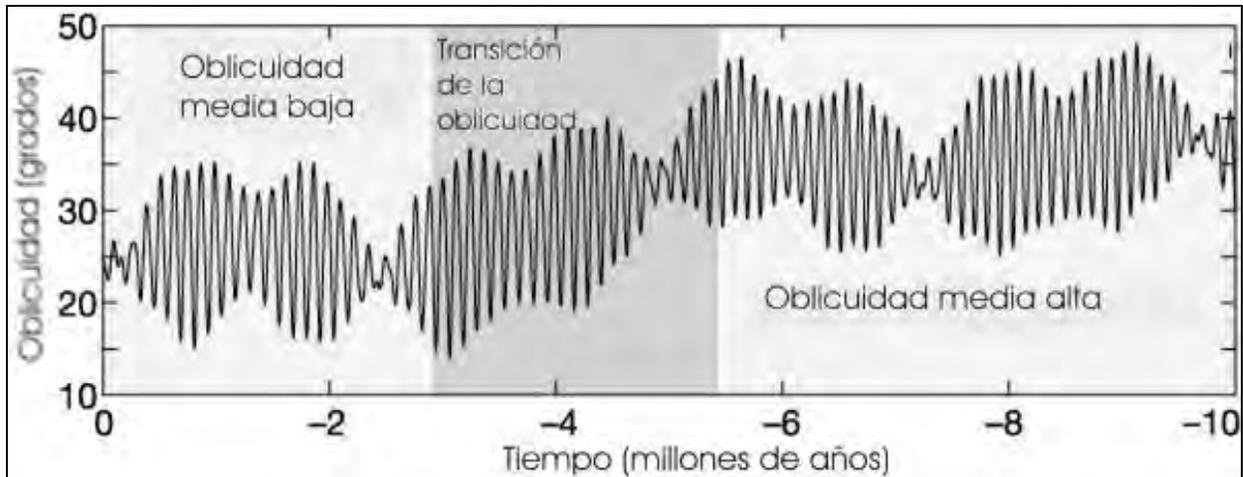


Figura 2.4. Evolución de la oblicuidad marciana durante los pasados 10 millones de años. La principal periodicidad de la oblicuidad es de casi 120, 000 años terrestres. Tomada de Levrard *et al.*, (2004).

Se han propuesto varios modelos (Mellon y Jakosky, 1995; citados por Arfstrom y Hartmann, 2005; Jakosky y Carr, 1985 citados por Kargel, 2004) que intentan explicar la formación de relieve glacial y periglacial de H₂O asociado a las etapas de oblicuidad marciana. Otro modelo es el de Arfstrom y Hartmann (2005), en el que hicieron una revisión de rasgos glaciales análogos a los terrestres, ellos señalan que la oblicuidad marciana ha experimentado variaciones caóticas entre 0° y 40° o aún hasta 60°, (según Laskar y Robutel, 1993; Touma y Wisdom, 1993, citados en Arfstrom y Hartmann, 2005).

Mellon y Jakosky 1995 (citados por Arfstrom y Hartmann, 2005), investigaron el efecto de la oblicuidad sobre la superficie de hielo durante los pasados 1.0 a 2.5 mil años y concluyeron que si bien los ciclos de oblicuidad pueden controlar el contenido de agua atmosférica y las temperaturas y hielos superficiales, la historia de la oblicuidad es incierta. Por otro lado, Jakosky y Carr (1985) calcularon que a la máxima oblicuidad, se remueven por año 20 cm de hielo de agua de las capas polares y se redistribuyen en una capa de 0.4 cm en latitudes no polares.

Con datos del espectrómetro de rayos gama de la nave espacial Mars Odyssey, Levrard y colaboradores (2004) hicieron simulaciones e interpretaron que en periodos de baja oblicuidad (menores de 25°) se forman depósitos de hielo a altas latitudes en ambos hemisferios por acumulación directa, como resultado de la sublimación de una reserva de hielo ecuatorial. También encontraron que a una oblicuidad de 30° el hielo se acumula únicamente en las áreas polares del norte. A la oblicuidad actual, el hielo cubre la mayoría de las áreas al norte de 65° N y comienza a acumularse cerca del hemisferio sur. Finalmente, a oblicuidades de 20° y 15° puede ocurrir una acumulación de hielo a gran escala orientada hacia los polos y a ~60° de latitud.

2.2.1. Barrancos en el Planeta Marte

Los primeros reportes acerca de la formación de los barrancos en Marte fueron realizados por Malin y Edgett (2000). Ellos analizaron e interpretaron las imágenes enviadas a la Tierra por la nave Mars Global Surveyor en el año 1999 (la cual ha mapeado la superficie marciana desde entonces), y sugirieron que un “fluido”, probablemente agua pura o altamente salina fluyendo a temperaturas de -25°C pudo intervenir en dicha formación.

Sin embargo, otros estudios sugieren que en vez del agua, el bióxido de carbono en estado líquido es el que ha intervenido en la formación del relieve (Musselwhite et al 2001, Drapper et al 2000, Hoffman, 2000).

Estas diferentes propuestas suscitaron una controversia acerca de la sustancia que ha formado dichos rasgos, por lo que investigar su origen es un gran reto. Actualmente, se conoce en parte la distribución de los barrancos y hasta se les ha asignado una edad (incierta) de entre 10,000 y 300,000 años.

En las primeras investigaciones, entre los años 2001 y 2003, se aseveraba que los barrancos estaban situados principalmente en el polo sur marciano y que se formaban cuando la capa de hielo disminuía durante la primavera marciana. Sin embargo, estudios posteriores, basados en un mayor número de observaciones, reportaron que también se han observado en el polo norte y en distintas latitudes, predominantemente en latitudes altas.

Para intentar explicar la formación de los barrancos, Malin y Edgett (2001) desarrollaron un modelo en el que se sugiere que el agua subterránea se filtró hacia las orillas de los acantilados y que fluyó por las laderas creando los barrancos (más adelante se mencionará nuevamente ésta y otra hipótesis).

Malin y Edgett sugirieron que flujos repentinos forman o formaron los rasgos mencionados debido a la existencia de una capa de roca porosa a poca profundidad de la superficie la cual mantiene al agua en estado líquido debido a la presión ejercida por la roca sobre ella. Cuando se produce un afloramiento efímero, el detrito de la ladera es transportado y acumulado colina abajo como un flujo lodoso compuesto de hielo, líquido, y detritos rocosos.

Lo anterior explicaría por qué, a pesar de la presión atmosférica marciana o suficientemente baja como para provocar una rápida evaporación del agua, ésta se mantendría en estado líquido por tiempo suficiente (quizá de horas) para formar un canal (Malin y Edgett, 2001).

Este modelo resulta un tanto controversial, pues la ubicación de los barrancos se presenta en regiones de temperatura tan baja que es difícil explicar cómo pudo haber intervenido el agua en estado líquido. Malin y Edgett insistieron en la acción del agua como formadora de los barrancos (Malin y Edgett, 2000), pero de haber existido agua líquida sobre la superficie marciana debió suceder en una etapa geológica muy antigua cuando las condiciones eran idóneas para la existencia de agua líquida sobre la superficie. Otros autores han buscado evidencia de acción hídrica en la superficie marciana, lo cual apoyaría al modelo anterior, por ejemplo, el trabajo de Gulick (2001) acerca de la densidad de la red fluvial, citada anteriormente. Sin embargo, eventos como los que menciona, debieron haber ocurrido en un pasado muy remoto de Marte.

2.2.2. Características generales de los barrancos.

Las imágenes que se han utilizado en casi todos los modelos para estudiar los barrancos provienen principalmente de la Martian Orbiter Camera, (MOC) a bordo de la nave MGS (Mars Global Surveyor). También están siendo utilizadas las imágenes obtenidas por la nave Mars Express de la European Space Agency.

Las imágenes de la MGS cubren un área de <1 km a 3 km máximo de ancho, con longitudes de pocos cientos de kilómetros (Malin y Edgett, 2000).

Durante las primeras fases de investigación se reportó que los barrancos estaban situados principalmente en el hemisferio sur (Malin y Edgett, 2000). Sin embargo, en imágenes recientes se han observado barrancos en zonas del hemisferio norte.

En el mapa de la figura 2.5 se observa la localización de los barrancos. Los sitios corresponden a sistemas o agrupaciones de barrancos y a latitudes medias, principalmente del hemisferio sur. Las coordenadas geográficas ubicadas en el mapa son aproximadas.

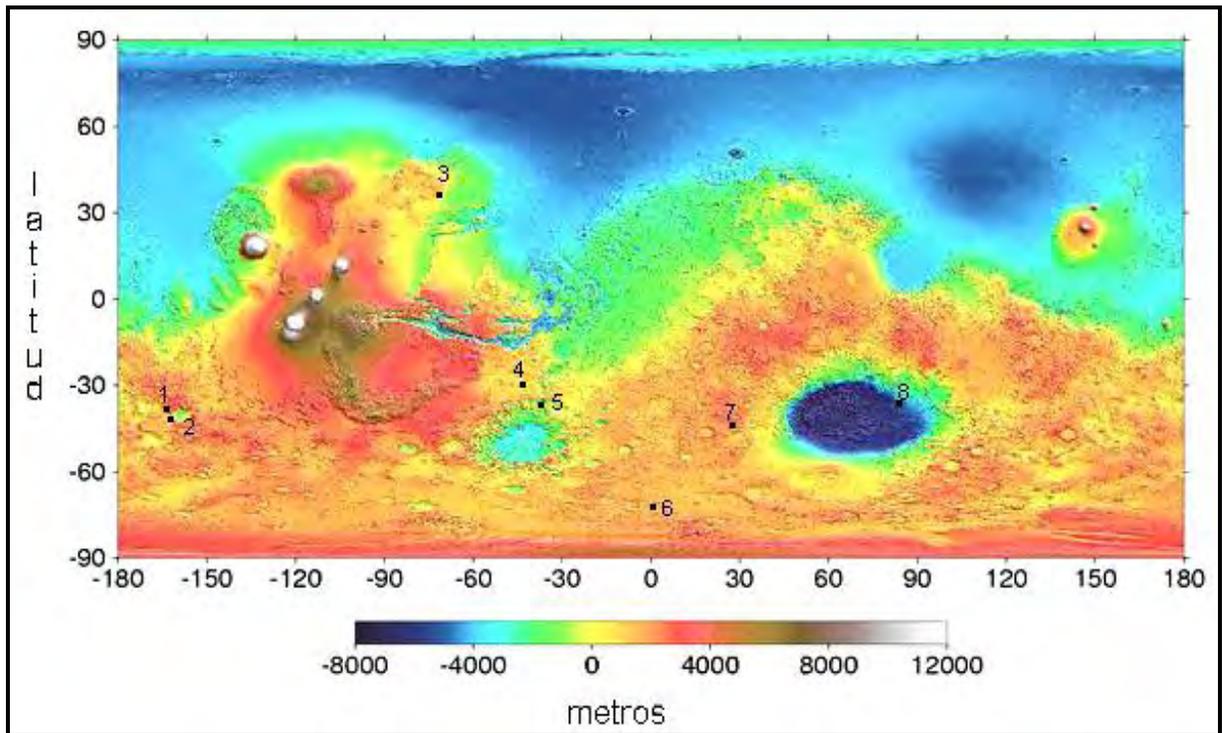


Figura 2.5 Mapa topográfico de Marte diseñado por NASA con datos del Altimetro Laser Orbitador de Marte (MOLA por sus siglas en inglés) a bordo del Explorador Global de Marte (MGS por sus siglas en inglés). En color azul está representado el relieve con menor elevación.

1. Gorgonium Chaos 37°S, 168°W
2. Newton Crater 46°S 163°W
3. Tempe Terra 40°N 68°W
4. Nirgal Vallis 27°S 39°W
5. Hale Crater 35°S 36°W
6. Polar Pits >70° S

7. Rabe Crater 44°S 326°W
8. Dao Vallis 36°S 270°W

2.2.3. Características particulares de los barrancos

Los barrancos incluyen tres distintas formas de relieve: cabeceras (alcove), canales (channel) y abanicos de depósito o conos (aprns), que también se observan en los barrancos terrestres. Recientemente algunos autores como Howard *et al.* (2008) prefieren el término *vertedero* (CHUTE) en vez de canal, pero en la literatura es más utilizado el término *channel*, (canal).

Los barrancos parecen ser geológicamente muy jóvenes debido a la ausencia de cráteres sobrepuestos a los canales y a los conos de eyección, y por comparación de estos rasgos con el resto de la superficie marciana (ver figura 2.6).

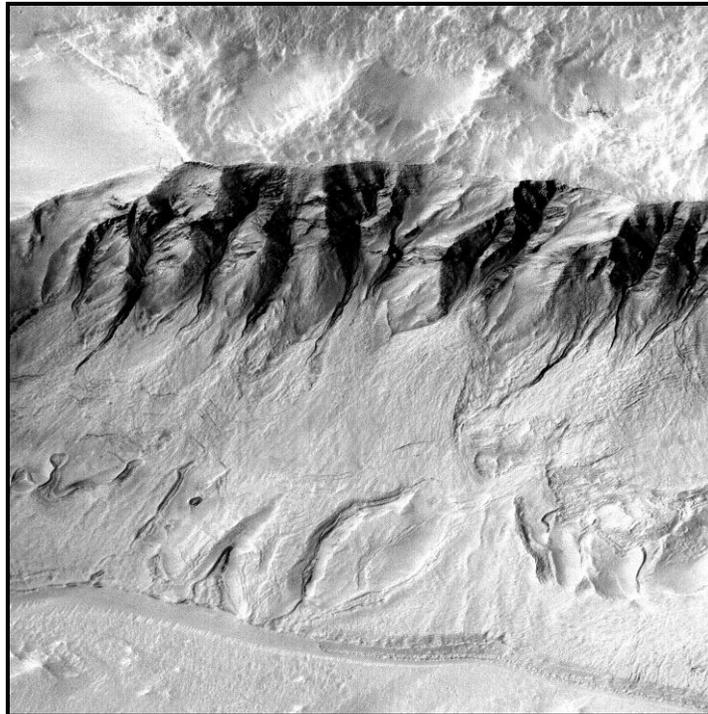


Figura. 2.6 Barrancos con apariencia joven debido a su ubicación en terreno casi sin cráteres de

impacto. Se observa un cráter difuso a la derecha de la imagen, en la parte central. Imagen MOC 671. NASA/JPL/Malin Space Science Systems.

Los canales se extienden desde la base de la cabecera hacia la parte baja de la ladera. Algunas formas sugieren probables meandros. Algunos canales se desvanecen gradualmente en sus depósitos.

La edad de estos rasgos es difícil de estimar. A pesar de la observación de que se forman en superficies de todas las edades, hay ausencia de barrancos antiguos, lo que es un enigma. Al parecer hay dos posibles explicaciones: Primera, los barrancos parecen ser jóvenes porque los procesos que los forman no operaban en Marte en el pasado. Segunda, sólo se ven los jóvenes porque los más antiguos están degradados a pesar de la acción lenta de la erosión. Las imágenes disponibles favorecen la segunda hipótesis. De hecho la formación de los barrancos parece ser un proceso progresivo, en varios casos, relacionado con procesos eólicos recientes que forman dunas. Son raras las imágenes en donde se muestran formas parcialmente erosionadas de los barrancos.

No es posible conocer qué tipo de material es transportado por los barrancos debido a la baja resolución de las imágenes disponibles, y a la falta de información espectral. A pesar de estas limitaciones, se ha inferido que el material consiste principalmente de detritos rocosos.

Los depósitos de los barrancos parecen erosionarse fácilmente y no dejar residuos detectables. Hay pocos indicios de que esos depósitos fueron erosionados por procesos intensos como inundaciones o deslizamientos de terreno (Treiman, 2003).

Los barrancos se localizan a varias latitudes norte y sur, pero predominan en el hemisferio sur. Además muchos de ellos se localizan en sitios con temperaturas de -70 a -100°C (Carr, 2000), lo cual no favorece los modelos de formación por agua, como se verá más adelante.

Algunos de los diferentes relieves en donde se localizan los barrancos se muestran en la figura 2.7 y son los siguientes: a) caldera (periodo geológico Hesperiano), b) calderas volcánicas (período geológico Amazoniano), c) bordes de cráteres de impacto, d) ladera de una mesa en terreno caótico (período

Hesperiano), e) cráteres del período Hesperiano, f) sedimentos del Hesperiano (Treiman, 2003).

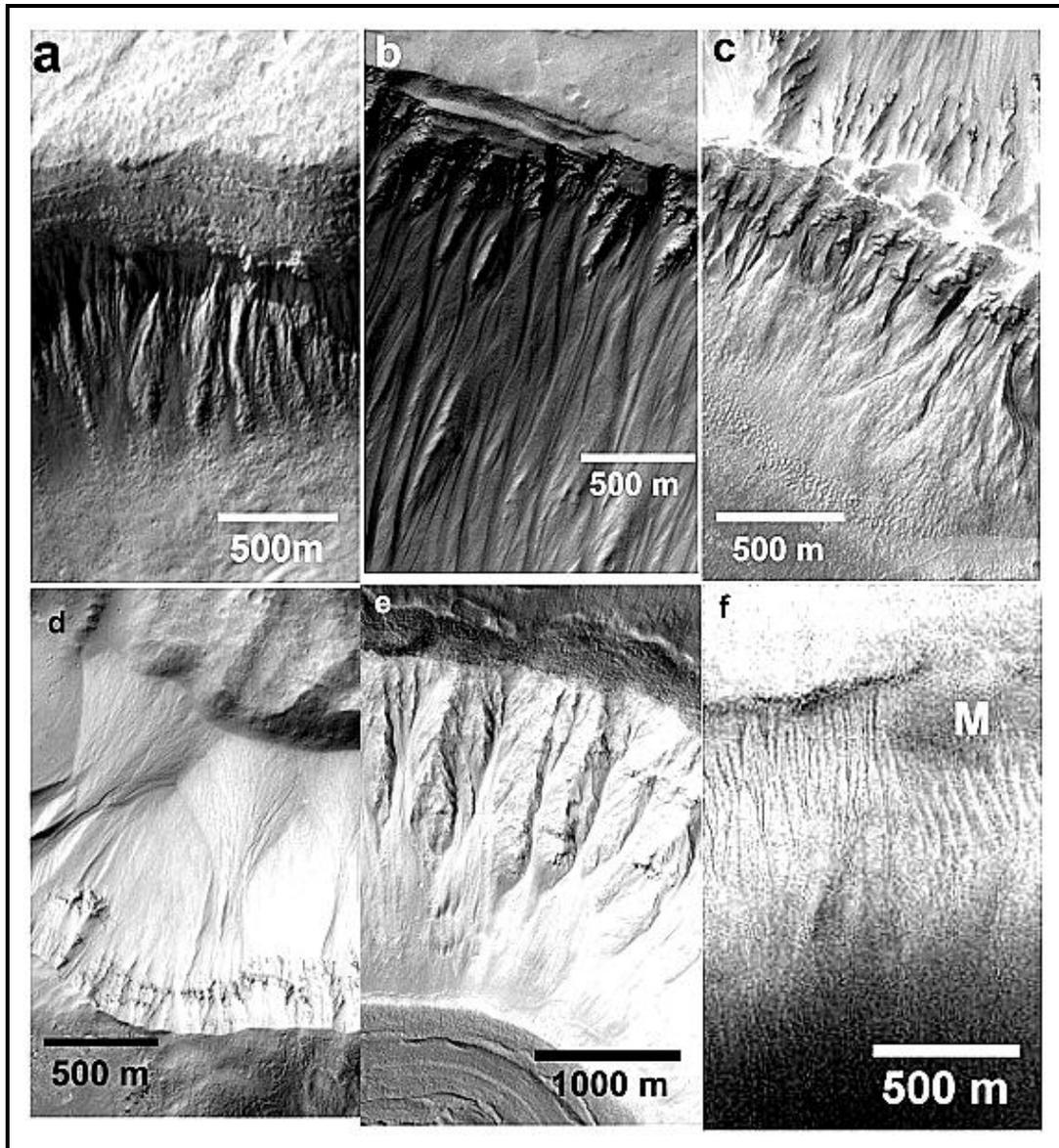


Figura 2.7. Barrancos en varios ambientes geológicos.

a) Cráter de colapso (período geológico Hesperiano, Cerca de Dao Vallis 263.0 W, 32.3 S imagen E02-00874. b) calderas volcánicas (período geológico Amazoniano), Pavones Mons 113.0W, 0.8N imagen M18-01192. c) bordes de cráteres de impacto, Ladera norte del cráter Hale 36.6 W, 34.8S imagen M14-00457. d) ladera de una mesa en terreno caótico (período Hesperiano), Gorgonium Chaos 174.7 W 38.6 S imagen E02-01674. e) cráter del período Hesperiano, Utopia Planitia 254.8 W 39.9 N imagen M19-01410. f) sedimentos eólicos del Hesperiano, Cuenca Hellas 289.1 W 48.7 imagen M08-02381. Tomado de Treiman (2003).

2.3. Agua y bióxido de carbono en Marte, ambiente actual.

Marte recibe 43% de la radiación solar que recibe la Tierra y aún un día cálido marciano es similar al ambiente de la Antártica terrestre, pero sin hielo .

Según cálculos astronómicos, en etapas antiguas el Sol era un poco más frío que ahora, emitiendo sólo el 70 u 80 % de su luminosidad actual, por lo que Marte pudo haber sido más frío en sus etapas primitivas (Fuente: <http://astronomy.swin.edu.au/sao/guest/hoffman/>). Pero aquí se presenta una paradoja, porque en el pasado Marte y la Tierra tuvieron mayor temperatura. Para tratar de explicar lo anterior, en la década de los setentas se sugirió que un gas de efecto invernadero, el amoníaco (NH_3), componente de la atmósfera primitiva marciana (periodo Noachiano), fue el responsable de mantener temperaturas más cálidas en el planeta. Sin embargo, este gas no puede sobrevivir mucho tiempo a la luz solar. Entonces se recurrió al y al vapor de agua H_2O para explicar que Marte haya tenido una temperatura mayor a la esperada. Estos gases, parte del conjunto de gases capaces de producir un efecto invernadero, posiblemente emanaron del manto del planeta debido a impactos con cometas o asteroides, y en el pasado existieron en cantidades considerables en la atmósfera, aunque actualmente esta cantidad sea baja. (Fuente: http://www.resa.net/nasa/mars_life_planetary.htm).

En caso de que el CO_2 , en Marte haya producido un efecto invernadero, se comportaría como un flujo, similar a un flujo piroclástico terrestre, pero de CO_2 ; no como un líquido (Hoffman 2000).

Para aclarar un poco, un escenario de efecto invernadero que pueden experimentar los planetas debido a la cantidad de agua suministrada por cometas o asteroides, se ha estimado el aporte que han recibido cuerpos existentes en la llamada zona habitable de un sistema solar o sea en donde pueden existir condiciones similares a las terrestres para que se formen cuerpos de agua.

Izidoro y colaboradores (2013) realizaron 54 modelos numéricos para estimar el abastecimiento de agua de posibles fuentes endógenas (vulcanismo) y exógenas (cometas), en planetas ubicados dentro de la zona habitable (entre 0.5-1.5 unidades astronómicas), en un sistema solar. Sus resultados, sugirieron que a 1 unidad astronómica los cometas suministran entre un 0% y 74% de agua. No obstante consideran que hasta ahora no existe una explicación satisfactoria del origen del agua en planetas tipo Tierra.

En otras simulaciones, los resultados del aporte de agua (por cometas o meteoritos) a los planetas terrestres, son muy variables. Por lo que pequeños cambios en las condiciones iniciales de los procesos de aporte, pueden llevar a resultados muy diferentes en términos de la posición del planeta, la masa, y la abundancia de agua (Lunine 2006).

Retomando el caso de Marte, la mayoría del CO₂ lo perdió, el restante se encuentra congelado en las capas polares y en la atmósfera. Una teoría es que parte del gas fue arrastrado de la atmósfera marciana por el viento solar y ésta pérdida redujo el efecto invernadero hasta que el planeta se congeló.

También la mayoría del oxígeno fue perdido por el arrastre del viento solar y el resto fue extraído de la atmósfera a través de reacciones químicas con la superficie (Fuente: <http://www.elatshaw.bol.ucla.edu/eriksterraforming2.html>). Por evidencias geológicas y geoquímicas, se propone que el bióxido de carbono ahora estaría capturado en las rocas y ello habría enfriado la atmósfera, lo que causaría menos vapor de agua y, por lo tanto, menor cantidad de la misma. Evidencia de estos procesos son, por un lado, los sistemas de redes fluviales que debieron formarse en un ambiente lo suficientemente estable para que el agua en estado líquido los modelara (Fuente: http://www.resa.net/nasa/mars_life_planetary.html). Por otro lado, los carbonatos formados no se reciclaron en Marte por carecer éste del mecanismo de placas tectónicas (parte importante del ciclo carbonato-silicato en la Tierra), sino que quedaron enterrados y el CO₂ no regresó a la atmósfera. Los carbonatos quedaron acumulados en depósitos y en sales como halitas (Fuente: <http://www.7nationalacademies.org/ssb/marsach09.pdf>).

Recordando que la temperatura media en Marte es de -55 °C y la presión

atmosférica es tan solo una fracción de la terrestre, es claro que actualmente no puede haber agua en estado líquido sobre la superficie, pero en un pasado muy remoto parece haber existido.

Actualmente no se sabe con exactitud cuándo y por cuánto tiempo Marte tuvo un ambiente cálido y húmedo. La atmósfera marciana probablemente se formó por gases volcánicos hace 4 mil millones de años en la etapa final del intenso bombardeo planetario. Por análisis de los sistemas de valles y el grado erosivo por agua corriente que muestran los cráteres de impacto, el efecto de invernadero pudo tener una duración de 500 millones de años. (Fuente: <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/M/Marspast.html>).

Parece un tiempo corto en términos geológicos, como para que haya habido gran cantidad de agua y se hayan formado enormes cuerpos de agua. Los resultados de mapeo realizados durante 6 años por la nave MGS, particularmente la erosión en cráteres de impacto y huellas de líneas de costas, indican la existencia de abundancia de agua en el pasado. (Fuente: <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/M/Marspast.html>).

Una vez que las teorías de un Marte con agua líquida en alguna etapa geológica fueron ampliamente aceptadas, se propusieron como objetivos de misiones espaciales explorar ríos, lagos y lechos oceánicos marcianos en búsqueda de signos de vida y de minerales con contenido de agua.

Una de las dos naves Vikingo se posó en parte de un sistema de canales y la misión Pathfinder “aterrizó” en otro canal cercano. Las imágenes de esas misiones mostraron enormes rocas hasta de 1 metro de tamaño que habían sido transportadas por flujos o corrientes (Hoffman, 2001).

No obstante las evidencias de la existencia de agua líquida en la superficie de Marte, ésta ya no existe más. Al perder gran parte de la atmósfera, este planeta también perdió agua. La que permanece como se ha mencionado se encuentra en forma de hielos polares o quizá como muchos investigadores sugieren, en reservorios bajo la corteza, aunque hay teorías recientes que no apoyan esta idea totalmente. En investigaciones realizadas por Craddock y Howard (2002) se señala que, en general, no hay manifestaciones superficiales de sistemas

geotérmicos como depósitos minerales o cráteres de explosión freáticos, por lo que sugieren que la densidad de las redes de drenaje es consistente con la lluvia y corrientes superficiales en el pasado remoto, en vez de agua proveniente del subsuelo.

Se ha establecido que la degasificación del agua y otros volátiles ha sucedido durante toda la historia geológica marciana, pero el mayor degasamiento ocurrió en el período Noachiano y en el Hesperiano temprano. El total de volátiles degasificados por el planeta fue calculado por Durand Manterola (2003) y es del orden de 3.73×10^{20} kg. Si se considera que la masa actual de la atmósfera terrestre es de 5.28×10^{18} kg, valor que equivale a 1 TAM (terrestrial atmospheric masses), el agua degasificada es de 64.27 TAM. El valor para la degasificación de CO_2 es de 6.43 TAM.

Considerando que 1 TAM de agua en Marte es equivalente a un océano de 36.5 m de profundidad entonces los 64.27 TAM son equivalentes a un océano con profundidad de 2345.9 m (parte de esta agua contenida en minerales). Con estos cálculos una de las conclusiones de Durand Manterola (2003) es que el agua se encuentra en acuíferos, pero muy profundos.

Por otro lado, Sears y colaboradores (2005) calcularon que la evaporación de agua en Marte es de 2.56 mm/h a 0°C y 7 mb.

Algunos resultados de estudios de existencia de agua en Marte dificultan conciliar la cantidad de agua y lugar de almacenaje o reservorios subterráneos en donde pueda encontrarse. Por citar un ejemplo, Hoffman (2001b) refiere que (por su experiencia en la industria del petróleo con fluidos atrapados en rocas sedimentarias), existe un espacio limitado en los poros entre los granos de las rocas. Si se trata de empujar gran cantidad de agua en las rocas, se colapsan; si se succiona el agua muy rápido, también se colapsan. Si se trata de transportar bastante sedimento en un flujo de agua, todo se convierte en una mezcla de lodo y se congela (bajo condiciones marcianas).

Lo anterior permite considerar que parte de la geomorfología marciana pudo haber sido modelada no sólo por agua sino por otros procesos, ya sean secos o gaseosos y que otro compuesto químico como el CO_2 es un buen candidato a

considerar en la formación de algunos rasgos como los barrancos.

Se esperaría que la mayor cantidad de agua en Marte se encuentre como hielo en las capas polares y permafrost el cual se extiende hacia el ecuador y a profundidades de varios kilómetros (Hoffman, 2001a).

En apariencia, las huellas de agua líquida es menos fuerte que la del hielo; sin embargo, más significativo que el derretimiento del hielo para el trabajo geomórfico, es la sublimación del hielo. La acumulación de hielos polares, de sólo 60 micrómetros cada año, construye capas de hielo que reptan y fluyen, se derriten y subliman (Kargel, 2004).

Por más de 50 años se ha sabido que la atmósfera marciana está dominada por CO₂ y actualmente se sabe que las capas polares contienen CO₂ sólido y que existen numerosos procesos que involucran al CO₂ en ambos polos.

Hace una década aún se aceptaba ampliamente que el agua en estado líquido era el principal modelador del relieve marciano, pero en años recientes el CO₂ ha tomado más importancia y más investigadores utilizan en sus modelos al CO₂ como un agente modelador importante.

Sin embargo, ha sido poco explorado de qué manera el bióxido de carbono puede ser responsable en gran parte de los rasgos de la superficie marciana (Hoffman, 2001a). Primeramente hay que considerar las características del CO₂ y algunas comparaciones con el agua. Este compuesto, en forma de gas pasa a fase sólida a temperaturas extremadamente bajas, alrededor de -150°C comparada con los 0°C para el agua en la Tierra.

La Tierra y Marte son los dos únicos planetas en el Sistema Solar con capas de hielo que se expanden y contraen debido a cambios estacionales. Sin embargo, las capas de hielo marcianas están compuestas de agua y CO₂ (este último más volátil que el agua) el cual se sublima a -78°C en la Tierra y en Marte se sublima a -130° C (Hoffman 2001) (Ver figura 2.8).

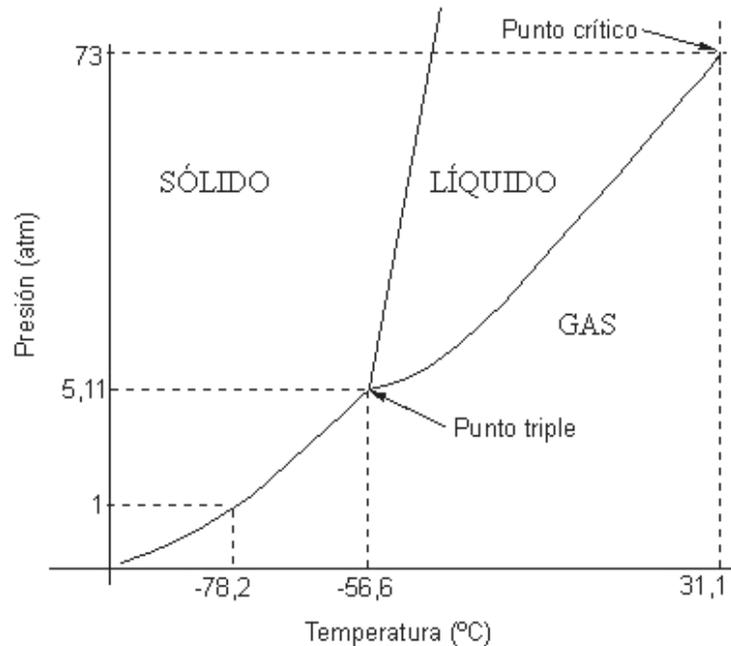


Figura 2.8. Diagrama de fases del CO₂. De acuerdo a las condiciones de presión (5,11 atm) y temperatura en Marte (-56.6), el bióxido de carbono puede existir en los tres estados (sólido, líquido y gaseoso) cuando alcanza el punto triple. En cambio en la Tierra el mismo elemento químico alcanza su punto triple a una atmósfera y a la temperatura de -78,2 °C (tomado de De Prada y Martínez, 2002).

En el siguiente apartado se citan los modelos que hasta ahora se han propuesto para explicar el origen de los barrancos. Al final de cada modelo se citan las inconsistencias de cada uno, reportadas por Treiman (2003, 2005) y Heldman y Mellon (2004), quienes revisaron las mismas hipótesis, aunque los nombres de éstas varían con cada autor.

Los primeros modelos que se reportaron fueron en los que interviene el agua, posteriormente se difundieron algunos modelos asociados con el CO₂ y con flujos secos granulares.

2.4. Teorías acerca del origen de los barrancos marcianos.

Actualmente, la existencia de agua líquida es difícil en el ambiente frío de baja presión cerca de la superficie marciana. No obstante, se han ofrecido muchas

otras ingeniosas explicaciones del origen de los barrancos. Otros estudios favorecen al bióxido de carbono a pesar de las dificultades producidas para retenerlo cerca de la superficie, y a los flujos de material granular seco.

Las siguientes hipótesis fueron las primeras propuestas que intentaron explicar el origen de estos rasgos. A partir de éstas, recientemente se han propuesto otras con algunas variantes.

I. Modelo de filtración de agua subterránea de Malin y Edgett (2001).

Para explicar la formación de los barrancos, Malin y Edgett (2001) desarrollaron un modelo en el que se sugiere que el agua subterránea se filtró hacia las orillas de los acantilados y fluyó por las laderas, creando los barrancos.

La idea de Malin y Edgett, (2001) es que flujos de agua repentinos forman o formaron los canales. El agua de estos flujos se infiltró por una capa de roca porosa quedando a poca profundidad de la superficie, manteniéndose líquida en un reservorio, debido a la presión ejercida por la roca emplazada en la superficie o barrera de hielo. Cuando se produce un afloramiento efímero el detrito es

transportado y acumulado colina abajo como un flujo lodoso de hielo, líquido y detritos rocosos.

Los barrancos reportados por estos autores, comienzan a casi 200 m por debajo del borde de los cráteres. Ellos sugirieron que esos barrancos estaban orientados hacia los polos en las latitudes medias de ambos hemisferios, debido a que las laderas reciben la cantidad de calor solar para permitir producción de agua líquida (Edgett *et al.*, 2003), pero datos posteriores negaron esta posibilidad.

Malin y Edgett (2001) también señalan que a pesar de la remota posibilidad de que algún fluido desconocido sea responsable de los barrancos, sus características son más consistentes con la acción del agua. La ausencia de una relación geográfica de estos rasgos con terrenos volcánicos o fuentes térmicas sugiere que factores ambientales superficiales y no procesos geotérmicos, controlan su desarrollo.

Posteriormente a este modelo de la infiltración del agua, Edgett y

colaboradores (2003) examinaron ~1300 imágenes y reiteraron que cualquier modelo sobre el origen de barrancos debe explicar la relación del agua con las capas rocosas. Aunque están de acuerdo en que los barrancos son geomórficamente jóvenes, no hay uniformidad en su edad. También se cita en ambos trabajos que en las imágenes se han encontrado barrancos o canales sin las tres características típicas (cabecera, canal y abanico de detritos), que están formados en dunas de arenas y que algunos autores no los han considerado en sus modelos (Ver figura 2.9). Algunos de estos barrancos se forman en un lapso de pocos años, como lo muestran las imágenes de la figura 2.10. Una nueva hipótesis para estos barrancos de Diniega y colaboradores (2013) es que trozos de dióxido de carbono congelado pueden deslizarse por algunas dunas de arena creando estas formas lineales. En el siguiente capítulo se aborda nuevamente esta hipótesis.

Cabe señalar que esos rasgos sobre las dunas de arena, tienen una morfología diferente a los barrancos que se analizan en este trabajo.

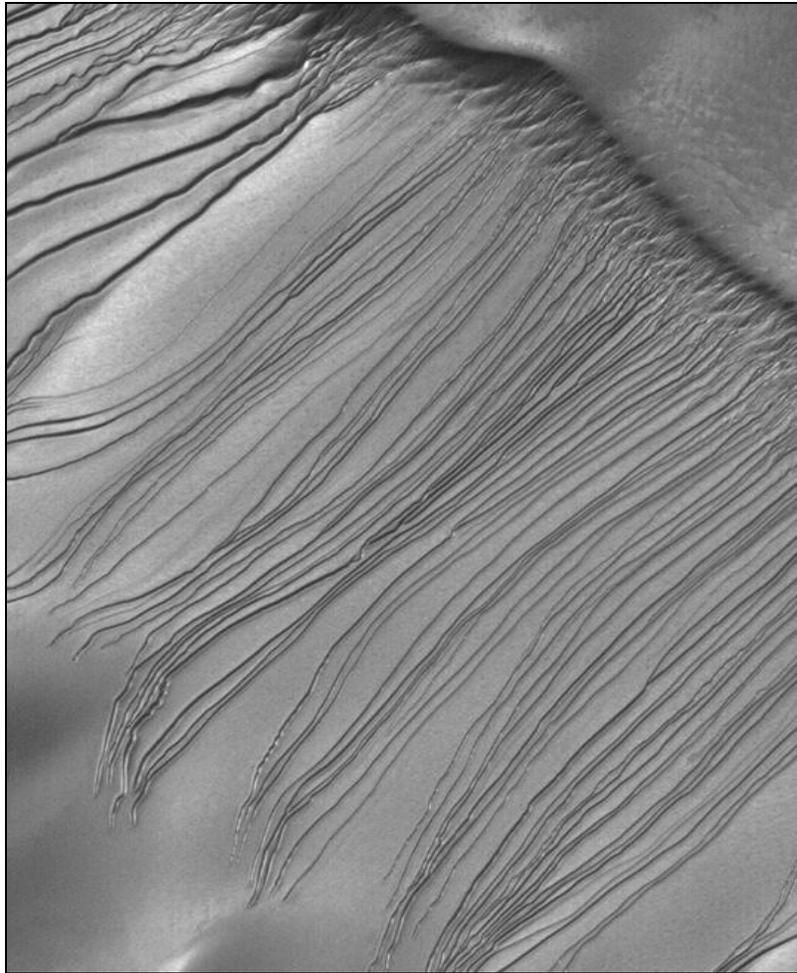


Figura. 2.9 Barrancos sobre una duna.

En esta imagen se ven barrancos sobre una gran duna de arena. Comienzan en la parte alta de la ladera e indican un flujo hacia el lado izquierdo. Pueden haberse formado por un fluido (líquido o gas) mezclado con arena. La MOC ha fotografiado nuevamente este sitio varias veces durante 3 años marcianos y no se han formado nuevos barrancos. La propuesta más reciente (Diniega y colaboradores, 2013) es que son originadas por trozos de dióxido de carbono congelado que se deslizan sobre la duna y crean los surcos. La imagen cubre un área de casi tres kilómetros de ancho y se localiza cerca de 54.5°S , 347.3°W . El Sol ilumina desde la parte superior izquierda. Imagen MOC2-243. Russell Dune 27-abril-2003

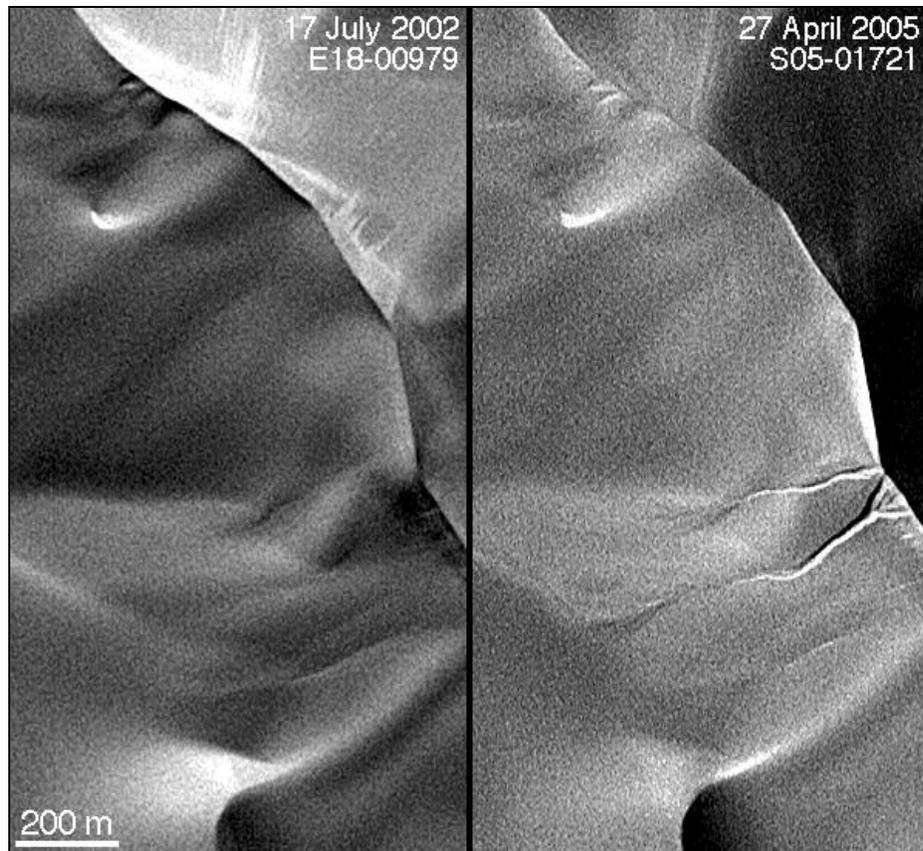


Figura 2.10. Barrancos activos. Estas imágenes obtenidas el 17 de Julio del 2002 (E18-00979), y el 02 de Abril del 2005 (S05-01721) respectivamente, muestran la formación de dos barrancos sobre una duna. En la primera imagen del año 2002, la luz solar incidía desde un ángulo (72.2°) más bajo en relación al horizonte, que en el año 2005 (56.6°). La interpretación del equipo de la MOC es que la arena en esta duna es un tanto cohesiva como se ha observado (por la MGS) comúnmente en dunas de arena durante los pasados ocho años. MOC 1220 B.

Algunas de las inconsistencias del modelo, referidas por Treiman (2003), son que el modelo resulta un tanto controversial, ya que la ubicación de los barrancos se presenta en regiones de muy baja temperatura como para que el agua en estado líquido haya intervenido.

También menciona que con la geología observada no es claro cómo los acuíferos, en rocas no estratificadas, pueden estar restringidos a elevaciones limitadas. No explican cómo pueden formarse acuíferos en picos aislados, picos centrales de cráteres e impacto y laderas de las cuencas de impacto. Además, no es obvio que las capas de roca impermeable puedan estar presentes cerca de los

cráteres de impacto, que típicamente están rodeados por material pulverizado (Treiman, 2003).

La propuesta de que los barrancos se formaron por filtración de agua se debió a la comparación que hicieron Malin y Edgett, (2001) con algunos barrancos terrestres.

La mayoría de los barrancos tienden a estar en laderas orientadas hacia la zona polar. Sin embargo, si el agua subterránea fuera la responsable se podría esperar la formación de estos rasgos en áreas más cálidas de Marte. En casos de barrancos formados muy cerca del borde de una ladera como el caso de las figuras 2.11a y 2.11b, los acuíferos estarían muy cerca de la superficie. Pero difícilmente se podría explicar que numerosos acuíferos existieran a diferentes elevaciones de la superficie, y a latitudes polares en donde también existen barrancos. También quedaría por resolver los procesos que generan la salida del agua a la superficie.

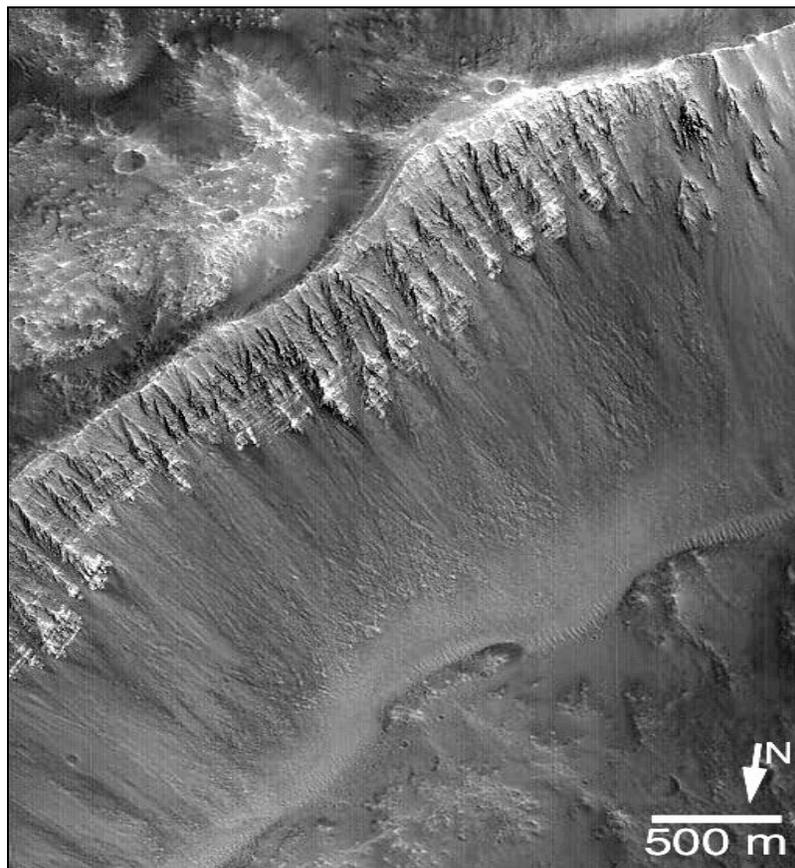


Fig.2.11 (a). Ejemplo de barrancos que inician muy cerca del borde de la ladera. Si existieran acuíferos su ubicación sería muy somera. Área Kasei Vallis. Imagen NASA/JPL/MSSS.

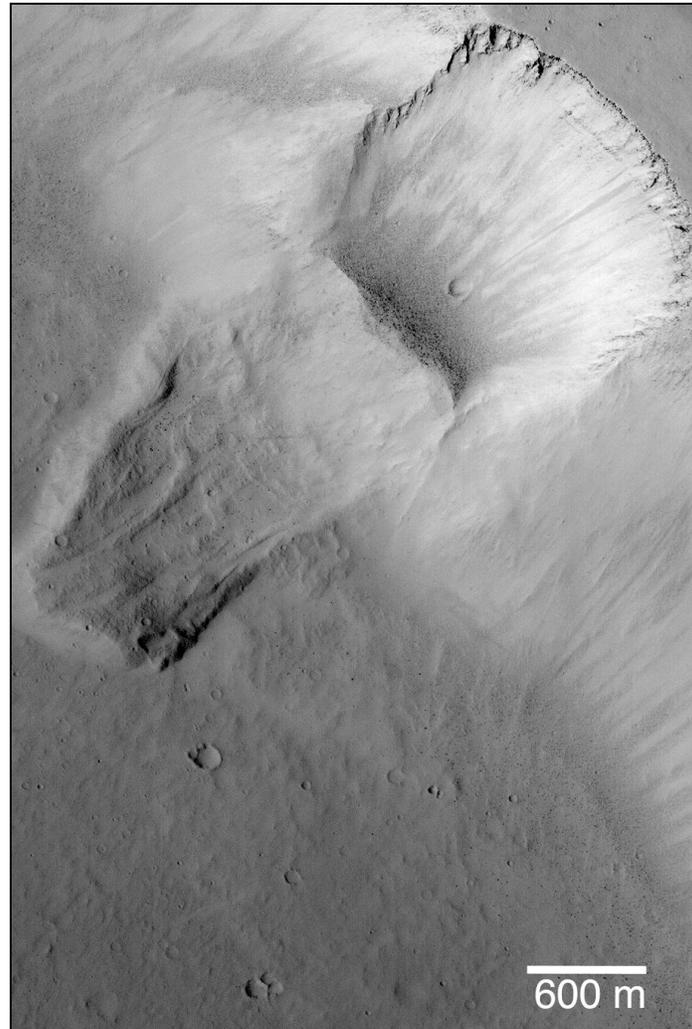


Fig. 2.11 (b)

Figura 11. La marca dejada por un deslizamiento de terreno revela capas en el terreno rocoso en lo alto de la ladera y muestra grandes rocas que rodaron y se depositaron en la base del deslizamiento. Existen algunos cráteres de impacto sobre el deslizamiento; esto indica que el deslizamiento es considerablemente antiguo y posteriormente se formaron barrancos sobre la ladera. MGS MOC2-326, 04 abril, 2003. Kasei Valles 28.3°N, 71.9°W

II. Agua subterránea.

Este modelo es propuesto también por Malin y Edgett (2003), pero es un tanto

similar al original en el que sugirieron que los barrancos marcianos se formaron por filtración de agua subterránea. Como es sabido, la mayoría de las áreas marcianas de la superficie y subsuperficie están a muy baja temperatura como

para permitir la existencia de agua líquida. Asimismo, la presión atmosférica marciana es muy baja. Para solucionar esta problemática, los autores recurrieron a situaciones especiales que explicarían la acumulación y filtración del agua subterránea.

Malin y Edgett propusieron que los acuíferos estaban situados en lechos estratificados. El agua estaba concentrada en capas porosas que fueron selladas y protegidas contra la evaporación por capas sobrepuestas impermeables.

Según su modelo, el agua fluyó hacia los acantilados arrastrando detritos los cuales fueron depositados en sus bases. El agua cercana a los detritos dejó una barrera de hielo que eventualmente se derritió y se formaron flujos de detritos lubricados por agua. De esta manera, comenzaron a formarse los barrancos en las bases de los acantilados. Los barrancos quedaron restringidos a las laderas orientadas hacia el polo debido a la cantidad de calor solar recibida, esto originó que el agua se evaporara o sublimara. En el ecuador presumiblemente las laderas reciben demasiado calor causando que el agua se evapore o sublime y en las altas latitudes permanecen bastante frías para que se produzca agua líquida.

Según Treiman (2003) muchos aspectos de esta hipótesis son inconsistentes con la geología observada. Por ejemplo, los barrancos se formaron sobre rocas no estratificadas, masivas y con escombros. No es claro cómo los acuíferos en tales rocas pueden estar restringidos a elevaciones u horizontes limitados. Tampoco es claro cómo se formaron acuíferos en algunos ambientes de barrancos, como lomas aisladas, picos centrales de cráteres de impacto y las crestas de las paredes de las cuencas de impacto.

Asimismo no es claro que las capas de roca permeable puedan estar presentes cerca de los cráteres de impacto, los cuales están típicamente rodeados por roca fragmentada o pulverizada. Finalmente, la inferencia de que los depósitos de barrancos están rellenos de roca es inconsistente con la evidencia de que las

rocas no son comunes, de acuerdo a las imágenes revisadas por Treiman. También es significativo que los barrancos en las cuencas polares estén orientados hacia el polo en la latitud 72° S. Únicamente durante épocas en que el planeta tenga una oblicuidad importante, las paredes de las cuencas recibirían suficiente insolación polar para permitir la formación de barrancos mediante el mecanismo expuesto por Malin y Edgett (2001) y Edgett y colaboradores (2003).

III. Nieve de agua derretida durante la oblicuidad.

En otro modelo propuesto por Christensen (2003), se expone que los barrancos pueden formarse por nieve de agua derretida que ha sido transportada desde los polos a latitudes medias en forma de *nieve acumulada* o *paquetes de hielo*, durante los periodos de alta oblicuidad correspondientes a 10^5 a 10^6 años (Lee *et al.*, 2002). A máxima oblicuidad, una capa de hielo de ~0.5-2 cm de grosor podría ser removida de la capa formada en verano y depositada a latitudes medias, debido al incremento de las temperaturas.

En su modelo, los barrancos se forman sobre laderas cubiertas de nieve que al derretirse se erosionan; o como resultado de aguas de fusión que se filtran en las laderas y las desestabiliza. Tal derretimiento puede estar ocurriendo actualmente en sitios favorables para la existencia de esas acumulaciones de nieve.

Christensen (2003) considera que tal derretimiento puede generar agua suficiente para formar barrancos en un lapso de tiempo de casi 5000 años. Calculó que para barrancos con tamaño típico de 20m de ancho medio, 500 m de longitud y 10m de profundidad, un total de $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ de sedimento habría sido removido de cada barranco cuando se deshiela la nieve de agua.

Christensen considera que hay una fuerte correlación entre las latitudes donde hay mantos ricos en hielo y los barrancos. Sin embargo, no se espera que todos los sitios de acumulaciones de nieve tengan barrancos. Estos no se forman donde la acumulación de nieve es muy delgada, la superficie muy fría o donde la nieve sea removida muy rápido para permitir que la fusión alcance el substrato antes que sea removida la nieve.

Este modelo también es apoyado por Dickson y Head (2005) quienes

revisaron imágenes MOC correspondientes a 30°S y 45°S y encontraron barrancos en picos centrales y bordes de cráteres de impacto. Citan que hay consistencia de la formación de barrancos con el cambio climático que sucedió a fines del periodo Amazoniano y proponen que los barrancos de los picos aislados se formaron por acumulación de nieve seguida de deshielo y escorrentía a fines del Amazoniano, como propone también Christensen (2003).

IV. Agua subterránea a profundidad somera

Frey y colaboradores (2004) intentan explicar la formación de barrancos por agua subterránea o hielo de agua localizados a un metro bajo la superficie marciana, basándose en la abundancia de hidrógeno cerca de la superficie. Utilizaron datos del espectrómetro de rayos gamma de la nave Mars Odyssey y seleccionaron 4 áreas con diferente abundancia de hidrógeno. De mayor a menor latitud y abundancia de hidrógeno, desde los -70°, 358° W, a los -35°, 37°W encontraron que también disminuía el número de barrancos. También reportaron que los barrancos de las áreas más ricas en este elemento, afloraban relativamente más cerca de la superficie del cráter en que se localizaron. Concluyeron que existe correlación entre la ubicación de los barrancos en las 4 áreas de estudio con la presencia de hidrógeno.

V. Agua subterránea calentada durante oblicuidad.

Gilmore y Phillips (2002a) examinaron 76 imágenes de la MOC correspondientes a tres regiones de Marte orientadas hacia los polos: el Cráter Hale (-36°S, 36°W), el Canal Nirgal Vallis (-28°S, 45°W) y el canal de (drenaje) Dao Vallis (36°S, 266°W) e interpretaron la geología de los sitios de barrancos (Gilmore y Phillips, 2002b). Estos autores reportaron que 49 de estos barrancos, comienzan a profundidades que oscilan entre ~70 y 1000 m bajo la superficie local. Interpretan que dichas profundidades están correlacionadas con cada unidad geológica, por lo que la profundidad puede estar controlada por la presencia de una capa impermeable y a su vez por la subsuperficie geológica. Sugieren que el agua subterránea es producida por el calentamiento durante

variaciones de oblicuidad y está controlada por las capas permeables.

En Lanza y Gilmore (2006) también se propone la existencia de los barrancos asociados al efecto de la oblicuidad y a la ocurrencia de acuíferos, así como a la insolación como un efecto controlador.

VI. Aislamiento. Hielo de H₂O cercano a la superficie.

En otra propuesta, Mellon y Phillips (2001) modelaron numéricamente la hipótesis anterior y citaron que “aún bajo las condiciones más óptimas”, cerca de la superficie el hielo no puede alcanzar el punto de derretimiento del agua pura (273 K) solo por el calor solar. Ellos propusieron el siguiente escenario: vapor de agua que se eleva desde la profundidad durante periodos de alta oblicuidad y se condensa como líquido bajo las capas impermeables cercanas a la superficie. Esta agua líquida evita el congelamiento gracias a una capa suprayacente de polvo.

A medida que disminuye la temperatura, el agua se congela lentamente e incrementa la presión sobre el líquido remanente. Bajo presión ese líquido sale explosivamente y se producen los barrancos.

En su modelo evaluaron dos posibles mecanismos para la formación de agua líquida bajo las condiciones marcianas actuales: 1- examinaron la estabilidad del hielo en el permafrost y el potencial de fusión del hielo cercano a la superficie mediante el calentamiento solar y conducción subsuperficial y 2- examinaron el potencial para el derretimiento y recongelamiento del hielo a profundidades someras debido a calentamiento geotérmico. Encontraron que el hielo cercano a la superficie no alcanza el punto de fusión del agua bajo un rango de propiedades termofísicas del suelo. La atmósfera permanece seca como para que el hielo del suelo se derrita aún a alta oblicuidad, en vez de esto el hielo se sublima antes de alcanzar temperaturas de fusión. Sin embargo, la presencia de sales en concentraciones de 15-40% puede bajar el punto de fusión para permitir que ocurra la fusión. Aseveran que el mecanismo geotérmico es consistente con las observaciones de la distribución de barrancos.

Las inconsistencias que cita Treiman (2003) son que los barrancos no están sobre laderas que recibirían adecuado calentamiento solar, ya sea en condiciones de oblicuidad extrema o normal. Muchos barrancos ocurren sobre terrenos que son escombros y no contendrían capas impermeables.

VII Acuíferos profundos y someros.

Heldmann y Mellon (2004) propusieron que el agua originada en la subsuperficie sería la que generara los barrancos.

Para explicar la existencia de barrancos citan que procesos interiores generan fluido en la subsuperficie en vez de procesos exógenos como vientos y caída de nieve. Crearon un modelo de temperaturas superficiales del terreno marciano proponiendo que el agua líquida podría existir en un acuífero superficial y emanar desde la base de la cabecera de un barranco, originando erosión y la posterior formación de toda una cabecera. Asimismo erosiona la estructura tanto por la superficie como por debajo de la misma.

Revisaron 106 imágenes de la MOC en las que reconocieron barrancos distribuidos en latitudes altas y medias del sur. Se enfocaron al hemisferio sur marciano para obtener mejor estadística. Analizaron las imágenes junto con datos de MOLA y midieron parámetros de la aparente profundidad en que se inician los barrancos, su distribución, dimensiones horizontales y verticales, inclinación y orientaciones.

Con los datos de elevación crearon un mapa topográfico y lo sobrepusieron a la región de estudio. Encontraron que desde la latitud 30°S va disminuyendo la cantidad de barrancos y el valor mínimo está entre 60 y 63°S y vuelve a aumentar después de los 63°. Por otro lado, reportan que su orientación es diversa. (Heldmann y Mellon, 2004; Heldmann *et al.*, 2005a).

Heldmann y colaboradores (2005b) también realizaron un estudio para el hemisferio norte y lo complementaron más adelante (Heldmann *et al.*, 2007). Localizaron barrancos en porcentajes de 84% en cráteres, 4% en terrenos de lomeríos, 3% en valles, 7% en otros tipos de terrenos y 2% en terrenos no

clasificados. Su distribución en el hemisferio norte está concentrada en Utopia Planitia, Acidalia Planitia, Tempe Terra y Arcadia Planitia, como se ve en el mapa de la figura 2.12.

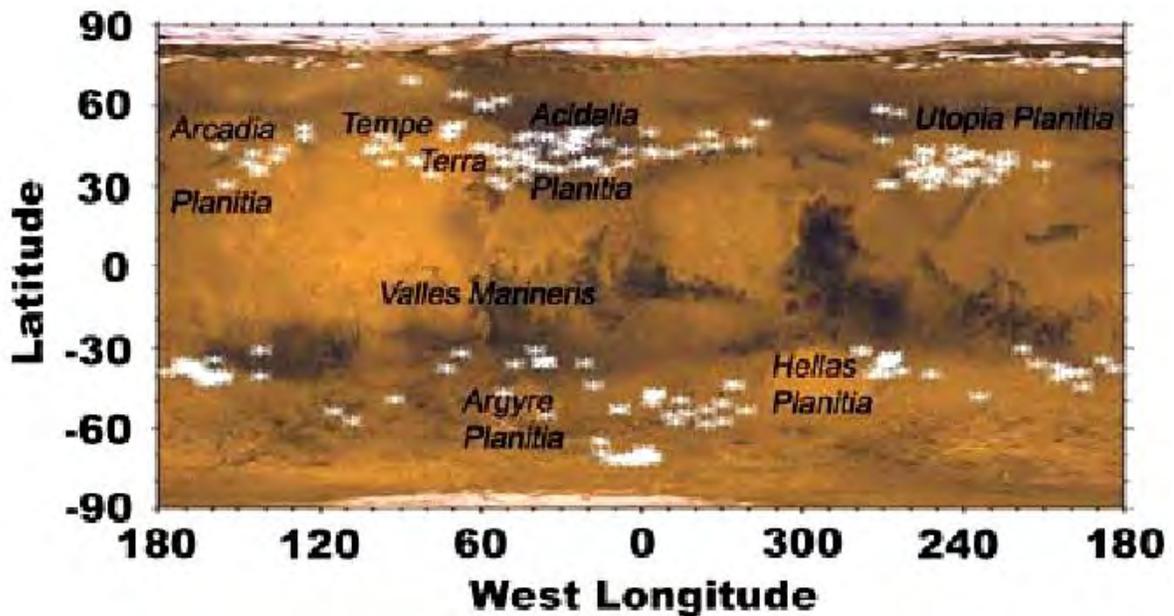


Figura. 2.12. Distribución geográfica de los barrancos marcianos. Los sitios de barrancos en el Hemisferio Sur provienen de Heldmann and Mellon (2004). Tomada de Heldmann *et al.*, (2005).

La mayoría de los barrancos permanece fuera de la fase de estabilidad temperatura-presión del CO₂ líquido. Además, generalmente los barrancos se localizan en áreas de bajo contenido de agua, de acuerdo con datos del Espectrómetro de Rayos Gamma de la nave norteamericana Odisea (GRS, por sus siglas en inglés).

La mayoría de las cabeceras se encontraron en ángulos de inclinación menores al ángulo de reposo y algunas cabeceras parecen estar en ángulos de reposo mayores mismas que pueden formarse por subsecuentes procesos gravitacionales y erosión de la cabecera.

Aunque estos autores reconocen discrepancias entre predicción y observación de sus modelos, concluyen que son los más plausibles y que los procesos predominantes formadores de los barrancos son subsuperficiales asociadas a

acuíferos someros (Heldmann *et al.*, 2007).

VIII Calor geotérmico.

Un escenario alternativo lo proponen Hartmann y colaboradores (2003). El calor requerido para producir agua líquida proviene de recientes y someras intrusiones de magma. La falta de barrancos en laderas orientadas hacia el ecuador es explicada por el calentamiento solar el cual las calienta tanto que el agua se vaporiza o sublima y no permite que se formen los barrancos.

Su escenario es similar al de Malin y Edgett (2001), pero es inconsistente con algunos ambientes geológicos y una reciente observación geofísica. Esto es porque la mayoría de los barrancos ocurre en áreas en donde no hay indicadores de actividad magmática reciente. Cabe citar que según Hartmann y Neukum (2001) los flujos de lava más jóvenes detectados son del orden de 10 Ma o menos lo cual no es consistente con la etapa en que las condiciones atmosféricas favorecerían la existencia de agua líquida superficial.

Además, muchos barrancos se encuentran en áreas que muestran indicios de hielo en el suelo. Si el magma se ha introducido someramente en tales áreas habría signos adicionales de interacción magma-agua como los cráteres tipo maar, o superficies de licuefacción, entre otros. Ninguno de éstos se ha observado.

Hartmann y colaboradores (2003) también reportan que han localizado barrancos análogos a los barrancos marcianos en laderas basálticas de Islandia, formados por flujos de detritos originados por saturación de agua subterránea o agua sobre las laderas.

Si las intrusiones ígneas someras han sido tan abundantes en el pasado geológico reciente como para producir barrancos por todo el planeta, sería razonable esperar al menos una intrusión todavía caliente. Sin embargo, aún no

se ha detectado esto con los instrumentos de la nave MGS ni por otros instrumentos (Treiman, 2003).

IX Criovolcanismo.

Gaidos (2001) sugirió un mecanismo diferente que permitiera que el agua líquida persistiera en la superficie. Esta agua se originaría en la profundidad ubicada en acuíferos de una corteza porosa y se movería rápidamente hacia los sitios de los barrancos. El agua es generada a profundidad por calor geotérmico,

se enfría, se congela y es presurizada por confinamiento mediante el crecimiento de tapones de hielo.

El congelamiento de los acuíferos aumenta la presión del regolito poroso ocasionando que el confinamiento del líquido se fracture, entonces el agua actúa como si fuera un cuerpo ígneo manejado por su propia flotabilidad y se introduce hacia arriba como un dique. El aumento de las presiones internas forma fracturas dentro de la criosfera que se propagan hacia la superficie marciana. Debido al aumento de presiones, el agua líquida es forzada a fluir a través de diques del acuífero profundo hacia la superficie.

Las inconsistencias que presenta el modelo es que aunque puede explicar muchas observaciones geológicas, como la presencia de barrancos en las calderas de los volcanes Tharsis, no ayuda en otros casos. No explica por qué las erupciones criovolcánicas favorecerían esos picos volcánicos y no las tierras bajas circundantes (Treiman, 2003). Como en otros modelos basados en el agua, no explica la ausencia o falta de rocas en los depósitos de barrancos. Por otro lado, no es claro cómo los acuíferos en rocas sin estratificar podrían estar restringidos a elevaciones u horizontes limitados ni por qué los barrancos ocurrirían en muchos niveles en una pared singular, ni por qué el agua saldría en ciertos horizontes de

las paredes de los cráteres de impacto. Tampoco explica cómo se rellenan los acuíferos en picos aislados (Treiman, 2003).

X. Reptación de hielo de agua.

Perron y colaboradores (2003) propusieron un modelo más, en donde sugieren que el agua interviene mediante la reptación, mediante repetidas fases de sublimación y depositación, para formar barrancos. Utilizando un simple modelo unidimensional midieron perfiles de elevación de las laderas de detritos en Marte.

Notaron que las inclinaciones de las laderas en donde se deposita el material son de $\sim 20^\circ$, es decir menores al ángulo de reposo ($\sim 35^\circ$) para material granular sin cohesión. Estas inclinaciones disminuyen al incrementar la latitud, lo que interpretan como indicio de influencia climática, existiendo un nexo entre clima, hidrología y procesos erosivos. Las bajas inclinaciones de las laderas son señales de reptación controlada por ciclos repetidos de depositación y sublimación de hielo de agua en el regolito y ha operado por $10^7 - 10^9$ años. Al parecer el hielo de agua ha modelado la topografía marciana durante el final del periodo Amazoniano.

Resultados de la nave Odyssey indican que fracciones del volumen de hielo a altas latitudes pueden sobrepasar la porosidad del regolito, lo cual implica la formación de cristales de hielo. (En este modelo los autores no dan los valores de tales fracciones).

Boynton y colaboradores (2002, citado en Perron *et al.*, 2003) estimaron que el metro más superficial de regolito marciano contiene $\sim 60\%$ de hielo de agua por volumen, mientras la porosidad estimada de las mediciones de densidad en el sitio de aterrizaje del Vikingo 1 oscila de $36 \pm 16\%$ para detrito grueso a $54 \pm 6\%$ para el polvo (Moore y Jakosky, 1989, citados en Perron *et al.*, 2003).

En otra teoría, Head y colaboradores (2007) realizaron estudios de campo en Antarctic Dry Valley por ser un desierto hiperárido polar como sitio análogo al

ambiente marciano. Según sus resultados, los barrancos pueden formarse por deshielo anual de la nieve de agua acumulada.

XI. Rezumado de salmuera.

Los modelos de agua pura son confusos. Así que tres grupos de investigadores (Doran y Forman, 2000; Knauth *et al.*, 2000; Wynn-Williams *et al.*, 2001; Knauth y Burt, 2002) sugirieron que los barrancos pueden haberse formado por agua salada.

El agua subterránea que interactúa con la roca se convierte en soluciones de salmuera que pueden tener temperaturas tan bajas como ~200 K y muy baja presión de vapor. Tales aguas atrapadas en acuíferos cercanos a la superficie podrían migrar a las paredes de los acantilados y, finalmente, producir los barrancos como sugirieron Malin y Edgett (2001) para el agua pura.

Este modelo resuelve muchos problemas para el mecanismo de temperaturas y presiones propuesto por Malin y Edgett (2001), pero quedan puntos sin resolver. Primero, como con la mayoría de otros mecanismos, el agua salada concentrada no explica la falta de rocas en los depósitos de barrancos. Segundo, no explica la presencia de barrancos en áreas de lecho rocoso sin estratificar, ni explica la presencia de barrancos cerca de los cráteres de impacto donde la roca probablemente es fragmentada y pulverizada.

Asimismo los escenarios no explican como el agua salada llega a ser secuestrada cerca de las partes altas de picos aislados (Treiman, 2003).

XII. Agua salada

En otro modelo, Heldmann y colaboradores (2005a) examinaron el

comportamiento de un flujo de agua para determinar cuáles son las condiciones consistentes con los barrancos marcianos.

En su modelo simularon numéricamente el flujo de agua líquida en un canal de un barranco marciano para saber si el líquido puede cavar los canales y la distancia hasta la que se desplazaría. Utilizaron agua pura y con diferente concentración de salinidad (hasta de ~5 veces la del agua). Primero aplicaron el modelo en un canal terrestre del Ártico Canadiense y después modelaron el comportamiento del agua para condiciones ambientales marcianas.

Para la Tierra sus resultados indicaron que el agua de salmuera forma barrancos con longitudes medias de 500 metros y para Marte el agua de salmuera fluiría a una distancia de 546 metros. Concluyen que este último resultado es consistente con la longitud que comúnmente se ha medido para los barrancos marcianos.

XIII. Erupciones de bióxido de carbono líquido.

Los modelos basados en el CO₂ hechos por Musselwhite (2001), Draper., (2000) y Hoffman (2001), y sus respectivos colaboradores, citados en Treiman (2003), sugieren que el bióxido de carbono como fluido y vapor, es el involucrado en la formación de los barrancos.

Proponen que el bióxido de carbono existe en la atmósfera o bajo la superficie marciana y que es concentrado o secuestrado en estratos rocosos porosos. Según el modelo, el CO₂ quedaría atrapado entre estratos impermeables. Cuando la temperatura baja, el hielo de CO₂ se forma más cerca de la superficie y sella la capa impermeable con un tapón de hielo. El CO₂ queda comprimido por el tapón y debido a que aumenta la presión de la capa rocosa de encima, alcanza el punto de liquefacción. Los barrancos se empiezan a formar cuando una capa impermeable se debilita o quiebra, y permite que el bióxido de carbono fluya hacia la superficie y se evapore. La nube de gas que se forma puede ocasionar detrito rocoso en suspensión y formar un flujo denso comparado a un flujo de cenizas de

un volcán de silicio.

Las inconsistencias que encuentran Heldman y Mellon (2004) en este modelo de acuíferos de CO₂ líquido son que no explica la distribución geográfica de los barrancos ni su escasez entre 30°N y 30°S como también reportan Malin y Edgett (2000) y Edgett y colaboradores (2003). Tampoco es claro cómo se formarían los barrancos en capas sin estratificar y cómo el CO₂ sería atrapado, licuado y retenido en esos sistemas. No es obvio que las capas de roca impermeables estén presentes cerca de los cráteres de impacto los cuales comúnmente están rodeados de roca fragmentada y pulverizada.

Debido a otras inconsistencias encontradas por Steward y Nimmo (2002), ellos no apoyan lo anterior ya que el CO₂ no puede acumularse en cantidades y áreas suficientemente grandes como para soportar la formación de barrancos individuales ni las concentraciones de barrancos observados en algunas áreas.

XIV. CO₂ líquido o gaseoso superficial

Hoffman (2003) asevera que el flujo que formó estos rasgos es probablemente bióxido de carbono líquido, o bien, CO₂ en estado gaseoso. Dicho proceso podría entonces ser de esta manera: en la primavera marciana el bióxido de carbono y la nieve congelados con temperaturas menores a -130° C, rellenan los valles; a estas temperaturas el agua no puede estar en estado líquido y ninguna sustancia basada en el agua puede fluir, por lo que se considera que las avalanchas de bióxido de carbono y detritos de roca son los responsables de los barrancos. Cabe aclarar que el bióxido de carbono no se derrite en Marte: cambia directamente del estado sólido al gaseoso, es decir se sublima.

Un punto que soporta este modelo es que en algunas áreas se han observado flujos que cambian de forma, debido al retroceso provocado por el deshielo anual. También se han observado extensos depósitos de nieve de CO₂ y hielo rodeando los flujos en áreas con temperaturas de -125 °C. En la figura 2.13 se ve una avalancha de CO₂ que probablemente apoyaría, en parte, el mecanismo citado.

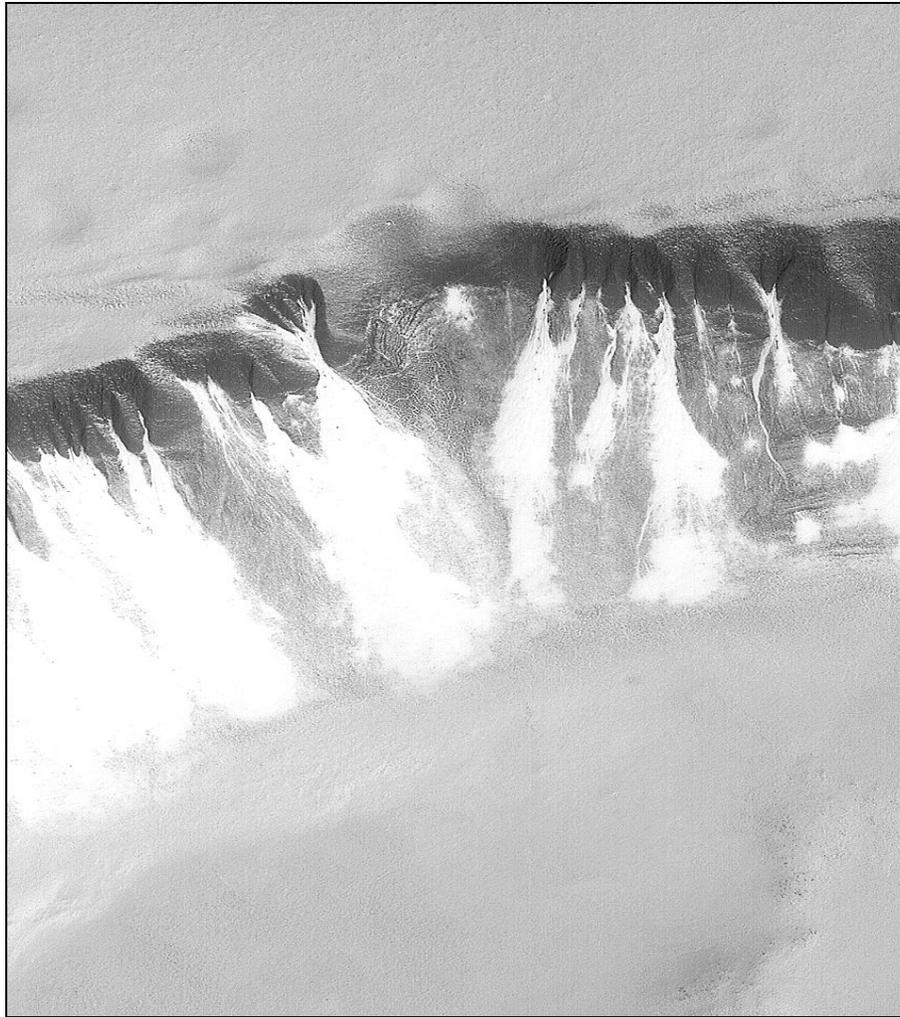


Figura. 2.13 Avalancha de CO₂ sobre zona de barrancos en el polo sur marciano. Durante la primavera; el hielo de agua y el dióxido de carbono acumulados previamente (en invierno), se subliman y se forman este tipo de avalanchas sobre las laderas. Imagen MOC-467. NASA/JPL/Malin Space Science Systems

Por otro lado, con base en las avalanchas de CO₂ observadas, Ishii y Sasaki (2004) propusieron que los barrancos se forman cuando el CO₂ congelado se condensa en la parte alta de las laderas de latitudes altas y medias y al sublimarse se provoca una avalancha que va erosionando la ladera formando canales, que gradualmente tomarán forma de V y construirán las cabeceras. Calcularon el grosor máximo del CO₂ congelado que se condensaría en una ladera de latitud media (30°) en el hemisferio sur, considerando los parámetros de latitud, oblicuidad y orientación de las laderas. Su resultado fue de 100 cm de CO₂

acumulado, como valor máximo.

Desde su punto de vista, la distribución, orientación y apariencia joven de los barrancos sería explicada por los ciclos anuales de condensación y avalanchas del CO₂.

XV. Barrancos como grandes flujos granulares.

Este modelo propuesto por Treiman (2003), difiere de los anteriores por completo. En un análisis detallado de otras hipótesis expuso que las relaciones geológicas de los barrancos fueron difíciles de reconciliar con los orígenes del agua o bióxido de carbono líquidos. Planteó entonces otra hipótesis basada en las similitudes observadas entre los barrancos y las avalanchas de nieve masiva; y enunció que podrían haberse formado de manera similar a los flujos de material granular seco. En Marte, los flujos probablemente serían de polvo y cieno depositados por viento.

Sugiere que los barrancos pueden estar relacionados con avalanchas de material granular fino, como polvo o partículas de arena. Se sabe que los materiales granulares finos son lanzados, transportados y depositados por vientos y que la geomorfología de Marte es bastante afectada por procesos eólicos (Kahn et al., 1992; Greeley et al., 1992; Malin y Edgett, 2001, citados por Treiman, 2003).

Treiman (2003) examinó miles de imágenes tomadas desde agosto del 2001 e infirió que el material depositado proveniente de los barrancos es granular fino, (polvo y limo, en apariencia similar a las avalanchas de nieve terrestres). Basándose en observaciones del color y brillo de los mantos de material sobre las dunas marcianas y por la ausencia de grandes rocas (figura 2.14) infiere que terrenos marcados con la letra **D** contienen manchas oscuras o brillantes, por lo tanto, no contienen rocas. Las partes cercanas a la base son dunas. El recuadro de la imagen b de la figura 15 muestra unas marcas onduladas en una cabecera que infiere, son dunas.

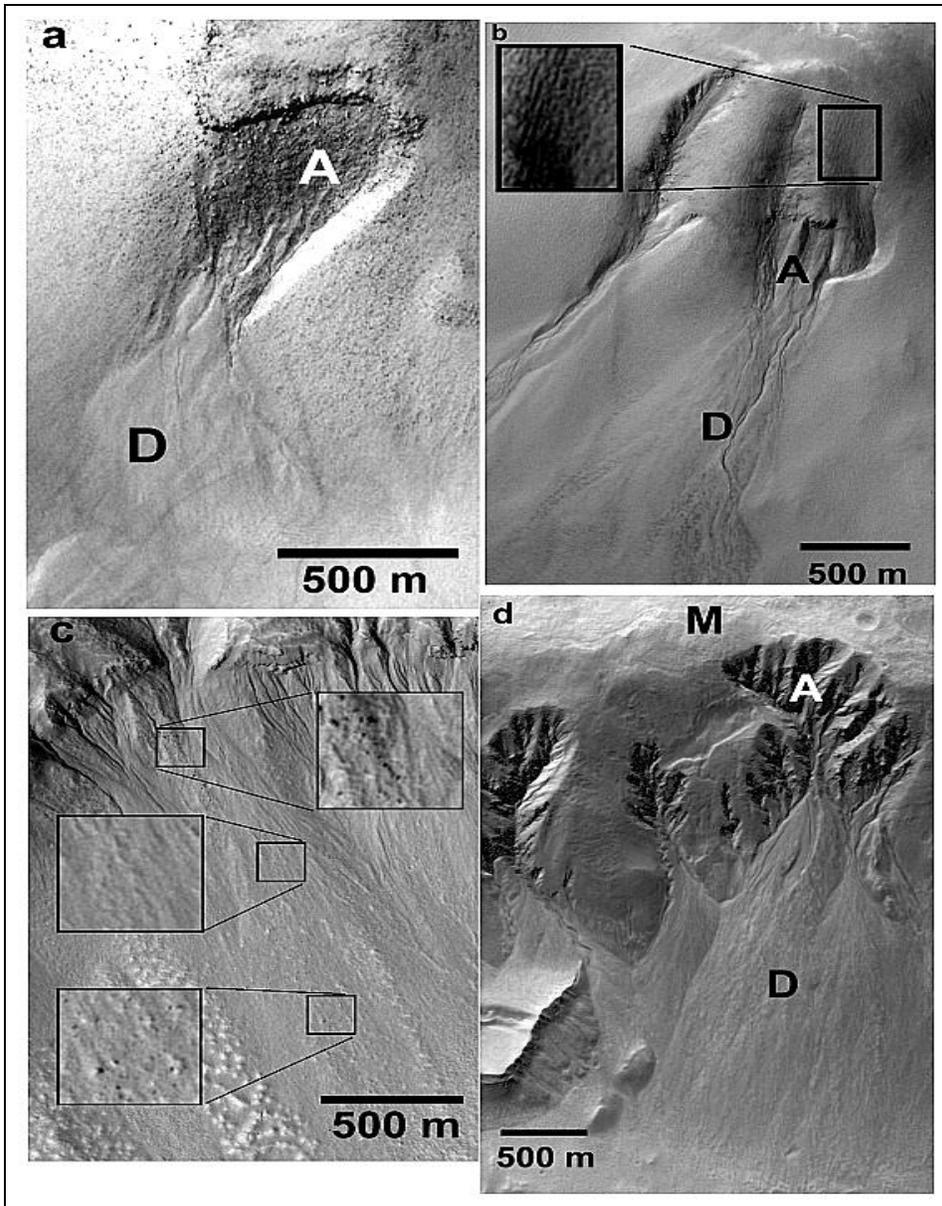


Figura. 2.14 Material rocoso en diferentes ambientes de barrancos. Tomado de Treiman (2003).

Treiman (2003) interpretó que el material rocoso depositado en las áreas marcadas con la letra **D**, es material fino. Las rocas con tamaño de hasta ~15 m de longitud se encuentran en las cabeceras de los barrancos, como en la imagen 14 a. En la imagen 14 c se aprecian laderas sin rocas grandes. También se muestra que este material rocoso granular se deposita en terrenos diferentes como planicies volcánicas, terrenos muy craterizados y terrenos poligonales, lo que indicaría que no habría relación entre los barrancos y el origen de los terrenos donde esos se forman.

Treiman (2003) destaca los siguientes puntos con los que sustenta su hipótesis:

- Los depósitos de barrancos están compuestos principalmente de material granular fino que puede ser transportado y depositado por el viento.

- La distribución espacial de los barrancos está relacionada a los patrones del viento marciano.
- Los patrones de viento predicen la ausencia de las relaciones entre la presencia del barranco y la geología subyacente.
- Los flujos de gránulos secos pueden comportarse como si fueran líquidos.
- Los flujos de gránulos secos pueden producir formas de relieve como aquellos de los barrancos.

Treiman (2003) considera que este escenario es consistente con el origen de los barrancos por flujos secos de sedimento eólico. Refiere que los depósitos de barrancos son materiales granulares finos erosionados por el viento y que la geomorfología y geología de estos barrancos son consistentes con la formación de flujos secos y no es requerida el agua líquida (Treiman y Louge, 2004). Treiman (2003) cita que no se puede recurrir a procesos gravitacionales, flujos de líquidos ni hundimiento, como fenómenos erosivos ya que no se observan remanentes de detritos, ni huellas o marcas de conductos, como canales, que hayan transportado material fino granular. Solo queda el mecanismo de abrasión del viento para explicar el material depositado cuyo tamaño sería $< \sim 100 \mu\text{m}$ como fue calculado por Greeley y colaboradores(1992) (citado en Treiman, 2003).

Este mecanismo de abrasión del viento está basado en el color similar que tienen los depósitos de barrancos y los materiales de las dunas. Como estos últimos se encuentran cerca de los barrancos y de sus huecos, pueden participar en la formación de los barrancos. Los flujos granulares pueden producir formas de relieve con características de barrancos marcianos, como avalanchas de nieve, las cuales comúnmente se desprenden desde las cabeceras de las montañas, forman un canal y se depositan como conos escalonados o lóbulos. Otros tipos de flujos granulares parecidos a los que forman los barrancos marcianos, son los flujos piroclásticos, aunque sólo se parecen en el tipo de depósitos que forman.

Treiman refiere que otros autores han tratado de explicar el patrón de distribución espacial de los barrancos, en términos de temperatura e insolación, pero considera que este patrón puede explicarse por los vientos marcianos con base al modelo de circulación global. Propone que si los barrancos marcianos

representan sedimento eólico acumulado en las laderas, se pueden buscar áreas de depositación de sedimentos y éstas se localizan en donde la desaceleración del viento es más significativa, o sea en las latitudes desde ~30°S a 50°S (Fenton y Richardson, 2001, citado en Treiman, 2003). Dentro de este cinturón el área de mayor desaceleración predicha está entre 120°W y 180°W, región de Gorgonium/Newton, donde son más abundantes los barrancos (Malin y Edgett, 2001). No obstante lo anterior, existen áreas sin mapear en latitudes altas (~72°) del hemisferio sur y algunas zonas de desaceleración no están asociadas a zonas de barrancos.

Dada la resolución espacial de las imágenes MOC (no más de 1.7 metros/píxel y la ausencia de información, también otros autores (citados en Treiman, 2003) han inferido el material acarreado por los barrancos sugiriendo detritos rocosos como una mezcla lodosa de hielo líquido (Malin y Edgett, 2000), o evaporación del CO₂ líquido en una mezcla con roca y hielo. (Musselwhite *et al.*, 2001), o bien flujos de detritos de H₂O mezclada con rocas y hielo de agua residual (Costard *et al.*, 2002).

Los modelos a favor del agua y bióxido de carbono líquidos no explican la inexistente relación entre los barrancos y la geología local que incluye edad, tipo del terreno circundante a los barrancos ni las propiedades de los materiales estratificados de las laderas en las que se desarrollan los barrancos. Pero Treiman (2003) enfatiza que su hipótesis de avalanchas secas sí es consistente con la relación entre los barrancos y el terreno circundante.

La morfología y distribución de los barrancos marcianos han sido atribuidas a la acción del agua líquida en la superficie y cerca de la superficie, basándose en la evidencia de la existencia de agua circunstancial y por analogía con las formas terrestres.

Con base en lo anterior, Treiman (2003) cita que a diferencia de los primeros reportes realizados por Malin y Edgett (2001), los barrancos se localizan en laderas de todos orígenes, en todo tipo de terrenos de todas edades, accidentados, todo tipo de substratos, masivos, con escombros y estratificados.

No obstante que estos rasgos son comunes en latitudes medias del hemisferio

sur, también se encuentran en terrenos cercanos al polo norte, en volcanes ecuatoriales o sobre planicies del hemisferio norte. La mayoría de los barrancos en el hemisferio sur están situados sobre laderas orientadas hacia el sur, pero también ocurren sobre laderas de diferentes orientaciones (figura 2.15). Se ha inferido que los barrancos están entre los rasgos más jóvenes sobre Marte, pero localmente están cubiertos por depósitos eólicos y cortados por fallas de antigüedad desconocida. Raramente se han encontrado barrancos erosionados o antiguos, y éstos últimos no tienen rastros de detritos.

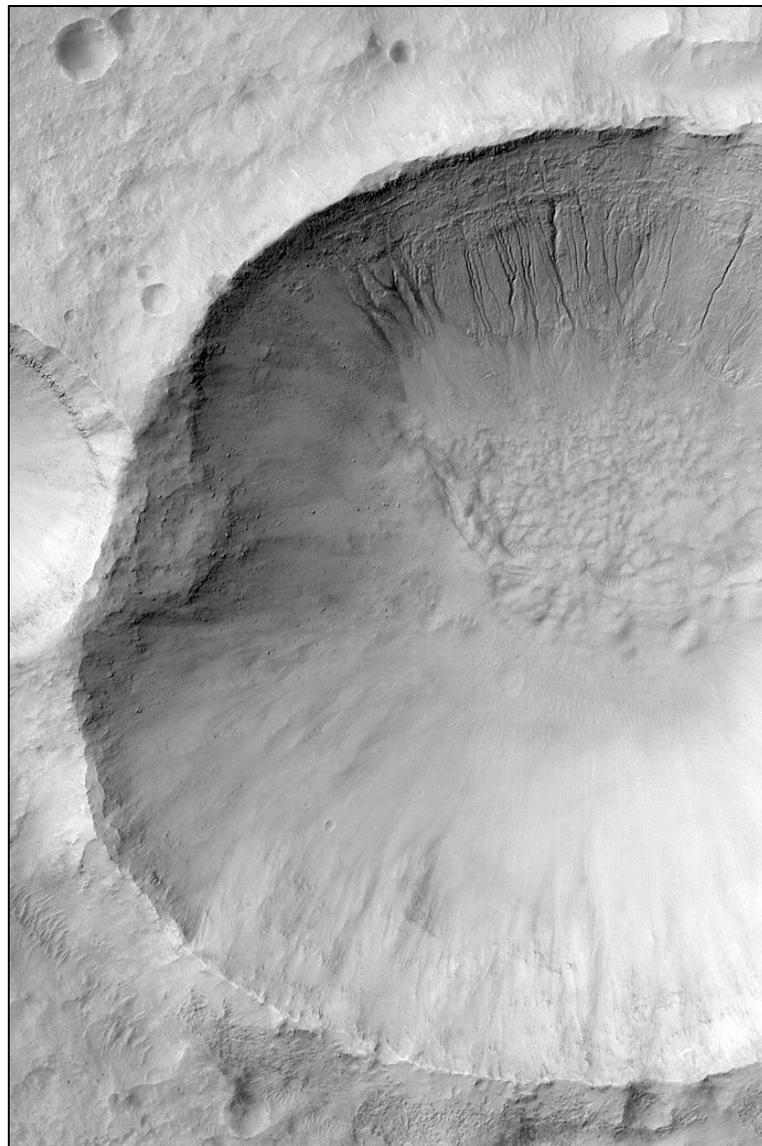


Figura.2.15 Imagen que muestra barrancos con varias orientaciones en un cráter de impacto. Imagen MOC2-720. Imagen: NASA/JPL/Malin Space Science Systems

A juicio de Treiman, todas estas evidencias son inconsistentes con las hipótesis publicadas de la formación de barrancos incluyendo el “rezumado” o escape de agua, actividad hidrotérmica, criovolcanismo y escape de bióxido de carbono.

Según Treiman (2003), las evidencias son consistentes con barrancos producidos por flujos secos de material eólico (polvo y cieno) comparable a las avalanchas terrestres.

Finalmente un modelo más, similar al de Treiman (2003), es el propuesto por Shinbrot y colaboradores (2004), con flujos de material seco fluidizados como formadores de los barrancos e iniciando el desplazamiento de material por un colapso abrupto o por el viento. Señalan que su modelo tiene limitaciones por lo que es necesario investigar más su propuesta.

En la tabla 2.2. Se resumen las principales hipótesis acerca del origen de los barrancos marcianos así como sus autores.

Tabla 2.2. Resumen de algunas de las hipótesis sobre el origen de los barrancos marcianos. Principalmente, los modelos se basan en tres hipótesis: agua, CO₂ y flujos de material seco, pero las dos primeras tienen variantes.

Teoría	Autores	Características
H ₂ O (líquida)	(Malin y Edgett, 2001)	Rasgos consistentes con transporte de masa por un fluido en movimiento
Calentamiento geotérmico	Hartmann (2001)	El agua es expulsada por geotermia.
Criovolcanismo	Gaidos (2001)	El agua es generada a profundidad por calentamiento geotérmico, se enfría y se congela. Es presurizada por confinamiento y forma un tapón de hielo
Rezumado de salmuera	Doran y Forman, 2000; Knauth et al., 2000; Wynn-Williams et al., 2001; Knauth y Burt, 2002	Filtración de agua con sales (salmuera) a bajas temperaturas y bajas presiones.

Agua líquida	Costard et al. (2002)	Agua líquida: el principal agente erosivo. El hielo del suelo somero derretido es la fuente del agua
Derretimiento de hielo del suelo somero	Gilmore y Phillips (2002)	Derretimiento del hielo del suelo cercano a la superficie. El agua derretida se percolaría a una capa impermeable que se metería hacia una pared inclinada expuesta.
Acuífero somero	Mellon y Phillips (2001)	Acuíferos cercanos a la superficie.
CO ₂ líquido	Musselwhite et al 2001, Draper et al. 2000. (Hoffman, 2000 2001, 2003)	Erupciones de bióxido de carbono líquido y vapor.
Flujos granulares finos	Treiman (2003)	Flujos granulares finos y secos transportados por acción eólica
Flujos granulares secos	Shinbrot T., Duong N.H., Kwan L., y Alvarez M.M (2004)	Desplazamiento de material por un colapso abrupto o por el viento

Como se aprecia, de éstas primeras hipótesis propuestas para explicar el origen de los barrancos, ninguna explica completamente su origen ni los procesos asociados a su desarrollo; en parte, por la aún insuficiente disponibilidad de datos enviados desde las naves de exploración. No obstante que actualmente se analizan miles de imágenes con alta resolución aún no se tiene una evidencia definitiva del origen de estos rasgos.

Sin embargo, es precisamente esta situación la que da la pauta para proponer nuevos modelos e ir discriminando los que no se ajusten a las observaciones.

Capítulo 3. Teorías recientes y CO₂.

Las teorías que involucran el CO₂ en la formación de los barrancos se han visto reforzadas debido al descubrimiento hecho por el Orbitador Marciano de Reconocimiento (MRO por sus siglas en inglés). La nave detectó una capa de CO₂, cuyo volumen es de entre 9,500 y 12,500 km³, en el polo sur marciano.

Aunque este hecho se destacó por su importancia para el sistema climático marciano también puede serlo para la existencia de los barrancos.

En el caso del clima, parte del CO₂ (Phillips *et al.*, 2011) lo identificaron enterrado y congelado, mediante señal de radar. Si el CO₂ se sublimara y fuera liberado, ocasionalmente se incrementaría a la atmósfera y aumentaría la intensidad y frecuencia de tormentas de polvo. Esto sería posible cuando Marte experimenta una mayor oblicuidad que la actual, según los mismos autores.

Paralelamente a la implicación que el CO₂ tendría para el sistema climático está la importancia de acumulación de CO₂ sólido en laderas de zonas polares o muy cercanas a éstas, en donde se han observado barrancos. En estos casos no se necesitaría un líquido para generar estos rasgos, al menos para alguna de sus etapas de formación. Es muy probable que se crearan por acumulación de CO₂ sólido y polvo en forma sucesiva.

Recientemente otros autores también han propuesto la posibilidad de que el CO₂ en estado sólido o gaseoso puede actuar en el desarrollo de los barrancos. Hugenholtz (2008), sugiere que el vapor de CO₂ se relaciona con los procesos remoción en masa y actúa como lubricante para el transporte de detritos en las laderas. Por otro lado, Dundas y colaboradores (2010) examinaron imágenes HiRISE con barrancos. Debido a las avalanchas de CO₂ que se han observado en escarpes situados en latitudes altas en los que bloques de hielo (a escala de

metros) fueron removidos, interpretan que el CO₂ congelado impulsa parte de la actividad de los barrancos y que puede ser un detonador para flujos granulares y posteriormente crear estructuras tipo barrancos.

Los barrancos sobre dunas han sido estudiados por Hansen y colaboradores (2011) y Diniega y coautores (2010). Los primeros han mostrado que las dunas en regiones del polo norte se modifican durante la primavera, cuando se sublima el CO₂. Parte del proceso incluye el viento y la sublimación, involucrados en el transporte de arena de las dunas.

Por su parte Diniega y coautores (2010) se enfocaron al estudio de este tipo de barrancos, observando las modificaciones que han tenido algunos durante 6 años marcianos. Proponen que la acumulación de CO₂ congelado puede ser importante en tales cambios.

En una hipótesis reciente Diniega y colaboradores (2013) plantean que los barrancos lineales sobre algunas dunas (figura 2.9) pudieron haberse formado por trozos de dióxido de carbono congelado que se deslizaron sobre *cojines* de gas, y crearon surcos (canales) a su paso. Sobre los canales observaron objetos brillantes que explicaron como los trozos de CO₂ congelado, los cuales no produjeron abanicos de escombros al final de su descenso, porque no transportaron material. Su propuesta la concibieron comparando imágenes del invierno y primavera concluyendo que los surcos se forman durante la primavera marciana.

Las siguientes imágenes HiRISE en las figuras 3.1 a 3.7 ilustran las regiones con barrancos en diferentes latitudes y diferente geomorfología, lo cual permite observar algunas de las características de estos rasgos señaladas previamente.

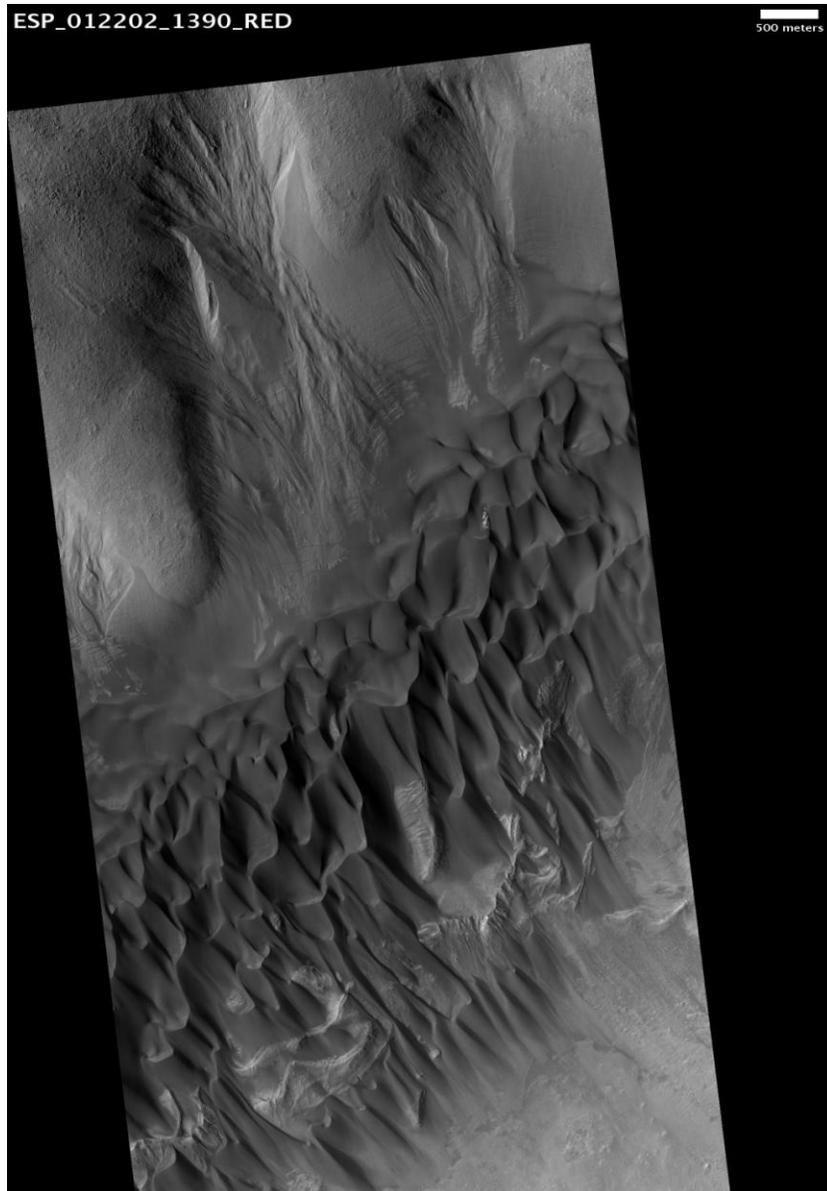


Figura 3.1.

Se observan barrancos en área de dunas y en la margen de la misma.

Se considera que la formación de barrancos se debe a procesos exógenos que no están asociados a algún líquido, ya que se ha reportado actividad reciente en algunos barrancos sobre dunas.

Coordenadas -40.5° latitud sur, 309.9° longitud

Imagen obtenida en el año 2009. Imagen ESP_012202_1390

NASA/JPL/UNIVERSITY OF ARIZONA

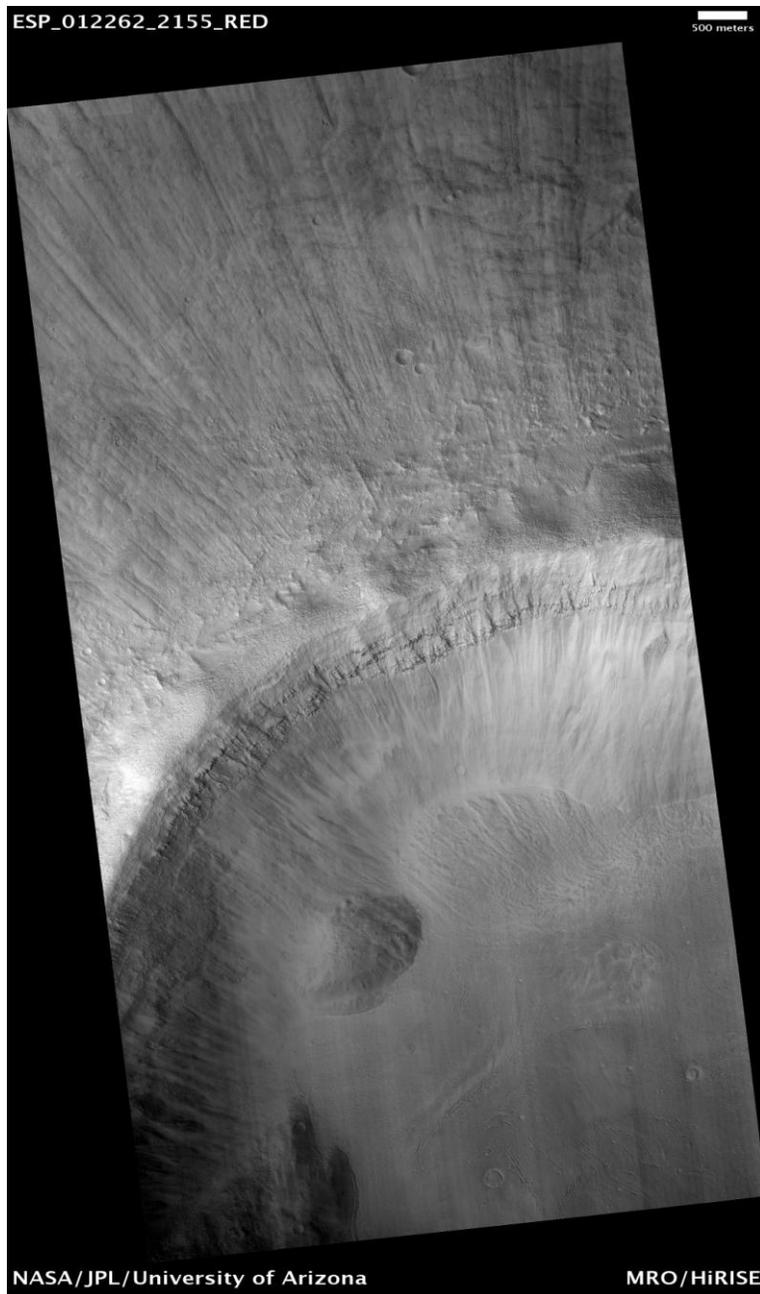


Figura 3.2. Numerosos barrancos en la ladera de un cráter.
Las laderas de muchos cráteres presentan barrancos con diferente morfología y orientaciones.
Este caso contradice en parte las teorías que apoyan una orientación preferente de los barrancos.
La imagen ESP_012262_2155 obtenida en el año 2009, tiene unas coordenadas de: 35.0 grados de latitud norte y 102.5 grados de longitud.
NASA/JPL/UNIVERSITY OF ARIZONA

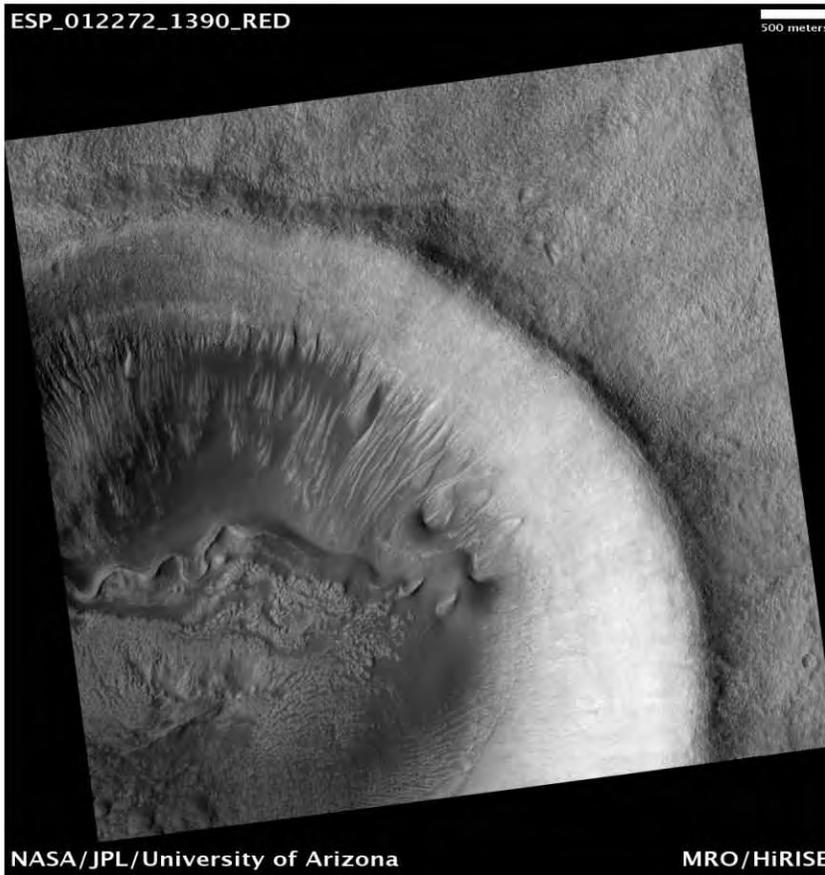


Figura 3.3 Barrancos con canales angostos.

Barrancos angostos y sin cabecera o poco apreciable. Las imágenes con más alta resolución han permitido distinguir rasgos difícilmente apreciables previamente. Un ejemplo es el relieve aparentemente llano en la ladera de un cráter de impacto, comparado con el relieve en una vista muy cercana con barrancos.

Imagen ESP_012272_1390 obtenida en el año 2009, con coordenadas -40.8 grados latitud sur y 200.3 de longitud. NASA/JPL/UNIVERSITY OF ARIZONA

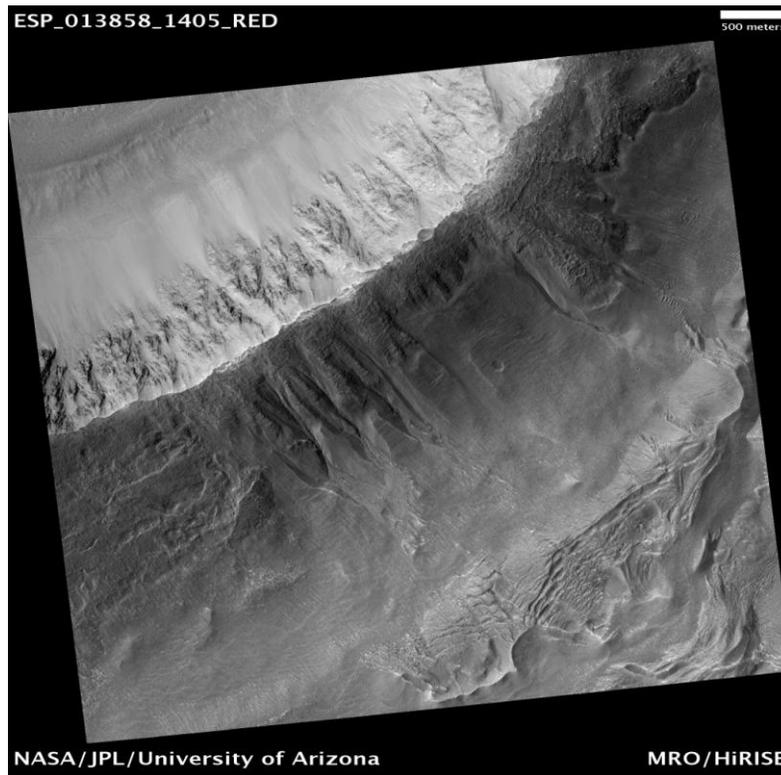


Figura 3.4
Algunos cráteres de impacto presentan barrancos también en sus laderas exteriores. Imagen ESP_013858_1405, obtenida en el año 2009. Coordenadas: -39.1 latitud sur y 97.9 longitud. NASA/JPL/UNIVERSITY OF ARIZONA



Figura 3.5.

La imagen muestra barrancos angostos. Se observan marcas de canales fuera de la ladera. Se desconocen los procesos formadores de estas marcas que parecen continuar hacia el interior del cráter. ESP_13948_1410. NASA/JPL/UNIVERSITY OF ARIZONA.

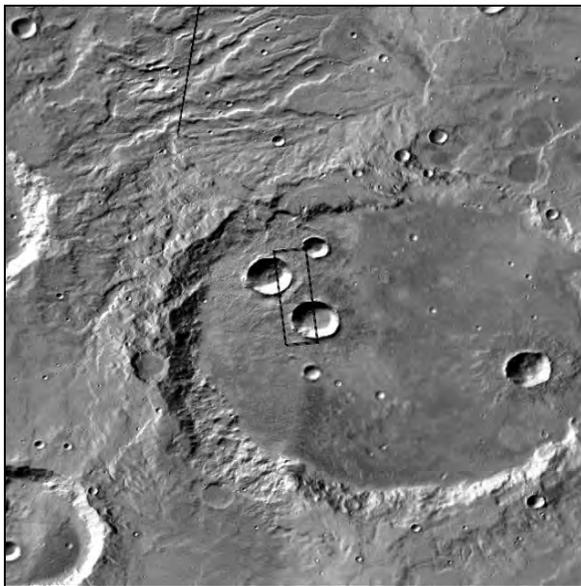


Figura 3.6 a

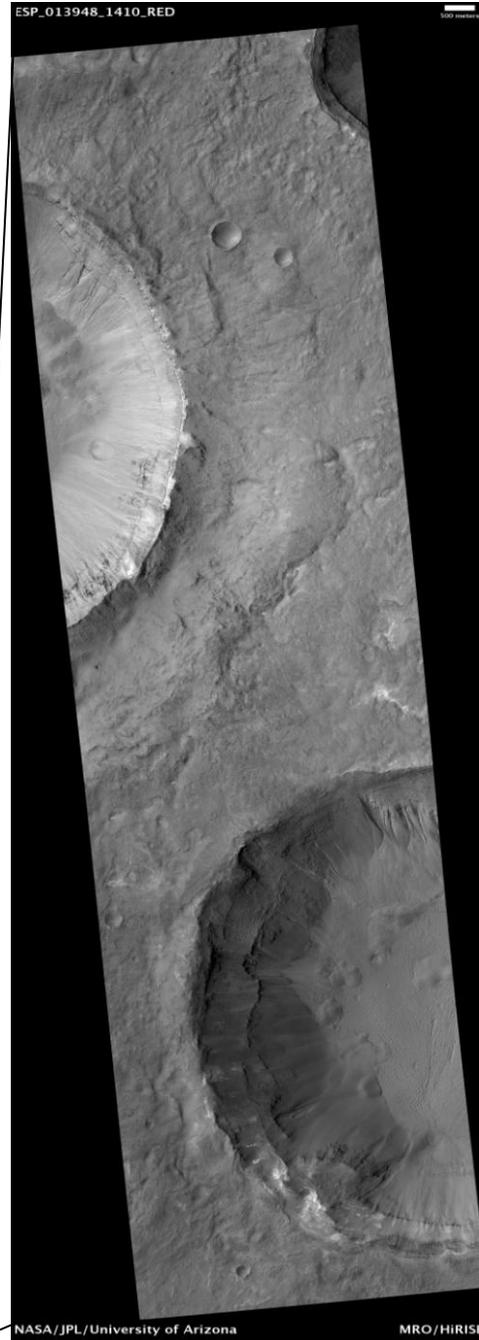


Figura 3.6 b

Figuras 3.6 a y 3.6 b. Barrancos en dos cráteres cercanos. La existencia de barrancos en cráteres cercanos parece evidenciar que estos se forman en cualquier ladera. Sin embargo, hay casos en que de dos cráteres cercanos sólo uno tiene barrancos. Coordenadas -38.70° latitud S, 159.36°

longitud E.

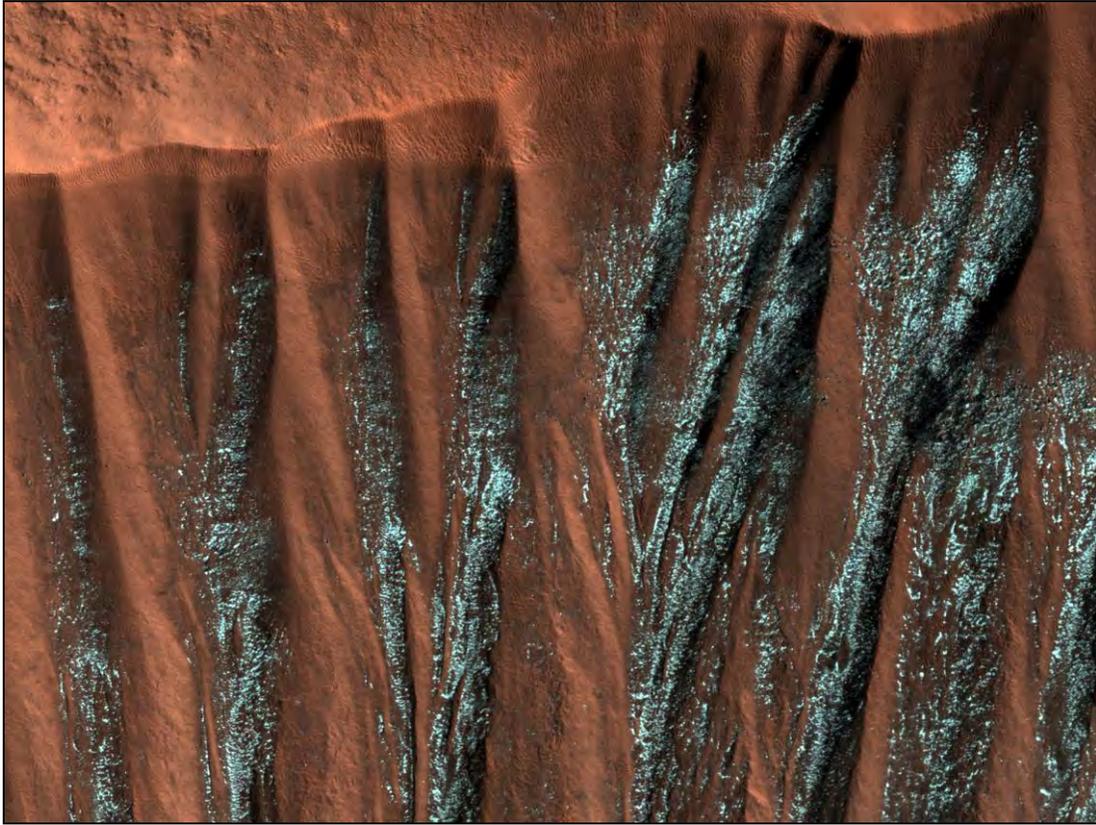


Figura 3.7 Otra variedad de barrancos con acumulación de nieve de CO_2 . Los barrancos inician en el borde del cráter. No se aprecian las cabeceras típicas. ESP_019033_2495 NASA/JPL/UNIVERSITY OF ARIZONA

Las diferencias observadas en estas imágenes sugieren que los procesos formadores de los barrancos marcianos son diversos y pueden variar en antigüedad. También sigue siendo cuestionable la intervención de algún líquido, al menos para los barrancos geológicamente recientes.

En resumen las teorías propuestas para explicar el origen de estos barrancos involucran los mecanismos siguientes:

- el agua filtrándose debajo de la superficie.
- el hielo o nieve derretida bajo o sobre la superficie.
- la escarcha de agua.

- la escarcha de dióxido de carbono (CO₂).
- los flujos de material seco.

Pero no existe evidencia directa que apoye a ninguna de estas causas.

CAPITULO 4 Modelo físico de la formación de un barranco.

4.1 Revisión preliminar de imágenes MOC (Mars Orbiter Camera). Ubicación de barrancos.

Con la finalidad de ubicar las regiones donde se han formado los barrancos marcianos, se hizo una revisión de imágenes disponibles obtenidas por la cámara denominada Mars Orbiter Camera (MOC) a bordo de la nave Mars Global Surveyor (MGS) mediante. Estas imágenes se transmitieron a la Tierra a partir del año 1999 y se hace referencia a ellas como imágenes MOC. Aunque durante la etapa preliminar ya se habían recibido miles de imágenes de la superficie marciana enviadas por otras naves espaciales, no todas mostraban la existencia de los barrancos. Por ello en éste trabajo se procedió a seleccionar imágenes en las que la morfología era más propicia para encontrar estos rasgos.

Se revisaron 67 imágenes con barrancos (ver Apéndice 1) y se ubicaron en 2 mapas geológicos correspondientes a los hemisferios norte y sur marcianos. Estos mapas se tomaron de Scott y Tanaka, (1986) y corresponden a las figuras 4.1.a y 4.1.b. Cada región (marcada con puntos negros) comprende grupos o sistemas de barrancos. En una misma región puede haber hasta 3 zonas con barrancos por lo que no es posible reportar un número exacto de los mismos.

El total de regiones con barrancos es de:

- 7 regiones en el Hemisferio norte.
- 48 regiones en el Hemisferio sur.

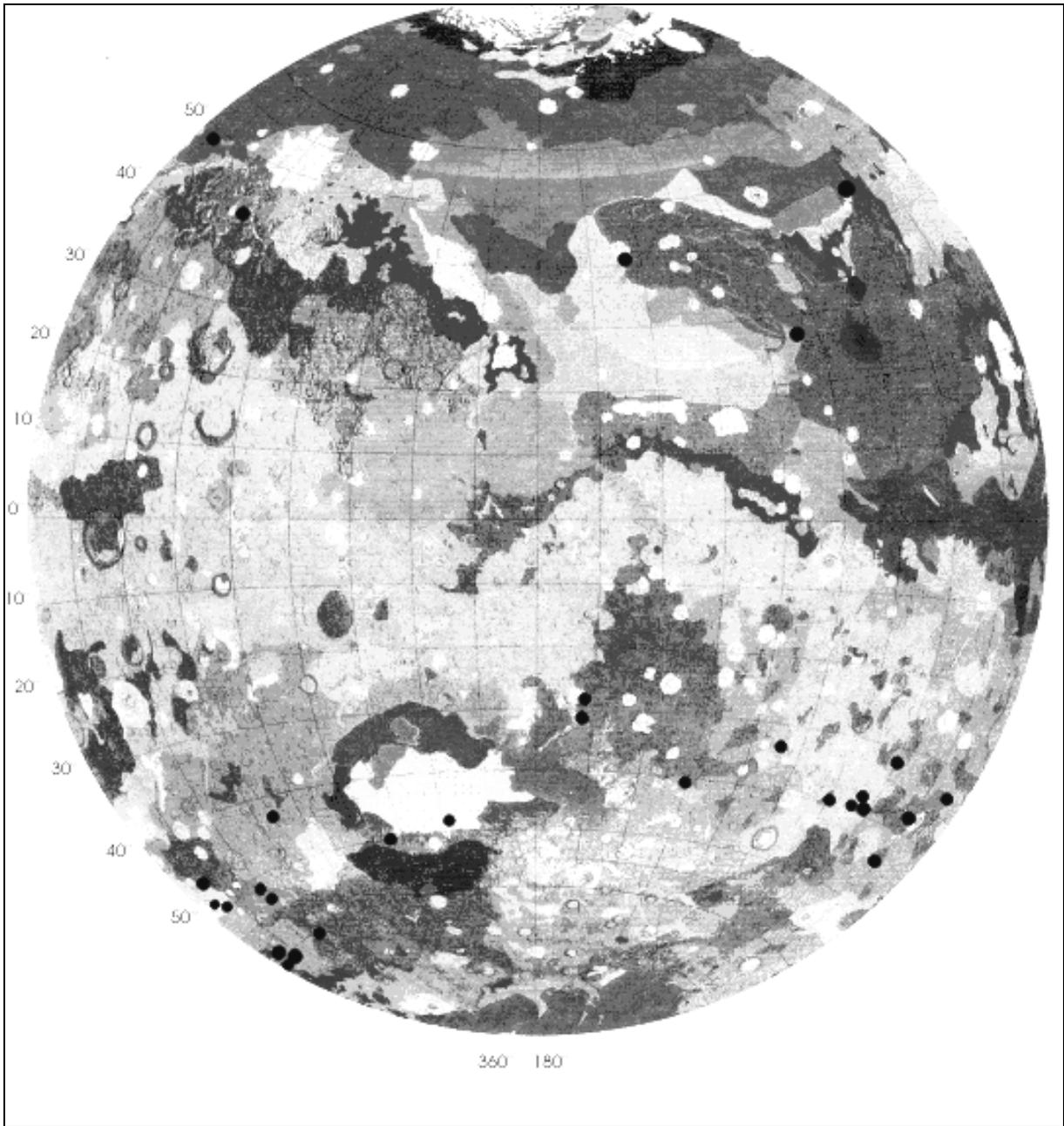


Figura 4.1 a. Mapa del Hemisferio Oriental de Marte. Los puntos negros representan sistemas de barrancos. Se aprecia que estos predominan en el hemisferio sur.

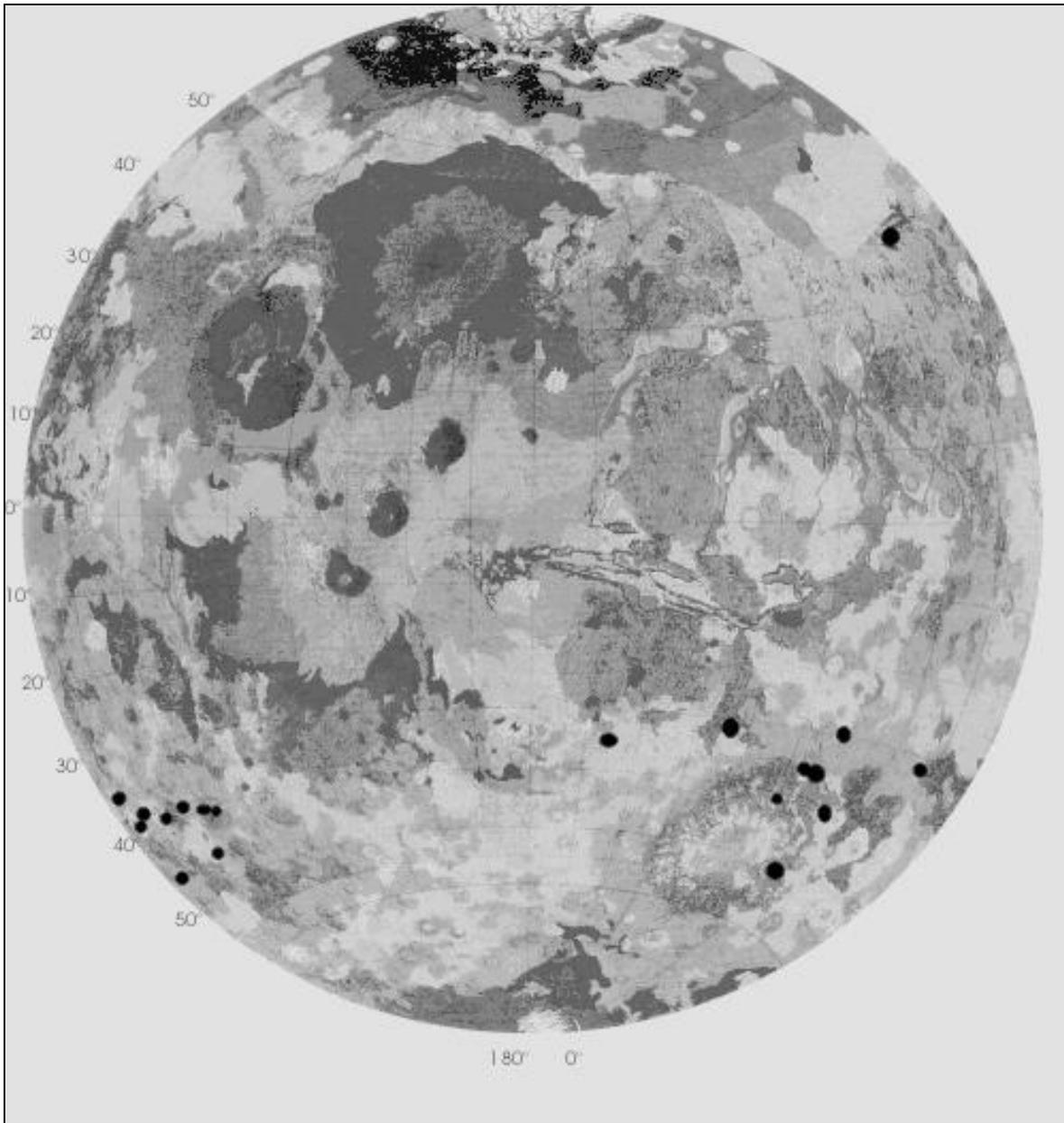
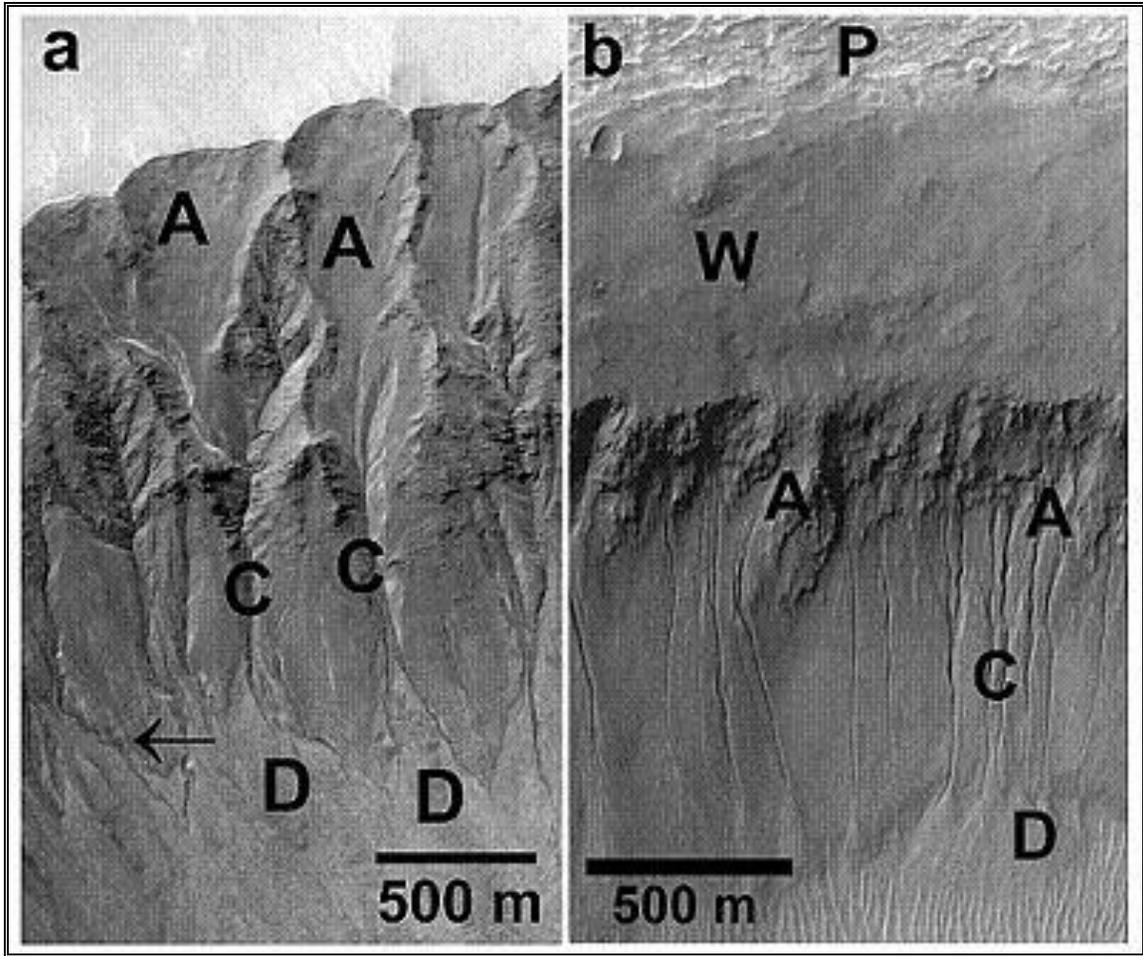


Figura 4.1 b. Mapa del Hemisferio Occidental de Marte. Nótese que los sistemas de barrancos también predominan en el hemisferio sur.

Estas regiones coinciden con terrenos geológicos de planicies de diferentes alturas, terrenos deformados, cráteres de impacto, materiales volcánicos, zonas montañosas y dunas, sin embargo, ello no indica que los barrancos sean de la misma antigüedad que esos terrenos.

Con este análisis preliminar de 67 imágenes MOC (Apéndice 1), se encontró que la mayoría de los barrancos estaban situados entre latitudes de 30° y 50° S, predominando en bordes de cráteres de impacto y particularmente en terrenos correspondientes a las eras geológicas del Hesperiano y Noachiano, pero también algunos del Amazoniano.

Se seleccionaron 4 regiones con barrancos y se midieron longitudes máximas y mínimas de los barrancos, utilizando un curvómetro. En cada imagen se observan sistemas de barrancos (figuras 4.2 a 4.4). Algunos se ven incompletos y no hay imagen anexa que permita medirlos totalmente. Más adelante estas mediciones permitieron comparar la longitud entre los barrancos marcianos y algunos terrestres de la zona de estudio que elegimos, en el Volcán Nevado de Toluca. La comparación se hizo considerando únicamente los barrancos que se ven por completo en las imágenes (Ver tabla 4.1). También se clasificó la red de drenaje en esas regiones, utilizando el método de Strahler (1993). El resultado fue una red de tipo paralela con un orden de corrientes predominante de 1° y 2° orden. La longitud de los barrancos y el orden de corrientes permiten inferir (al menos para estos ejemplos) que el material que los formó no los ha cavó profundamente.



M14-01830

M03-02290

Figura 4.2.

Figura 4.3

Diferentes características de los barrancos marcianos ubicados en laderas de cráteres de impacto. En la imagen 4.2 la cabecera se formó desde el borde del cráter, y los canales son cortos. En cambio en la imagen 4.3 los barrancos comienzan en un área más baja de la ladera y los canales tienen mayor longitud. También se observa en la imagen del lado izquierdo que los canales muestran una forma sinuosa, a diferencia de los canales de la imagen derecha que tienen apariencia más recta.

Crédito: NASA/JPL/Malin Space Science Systems

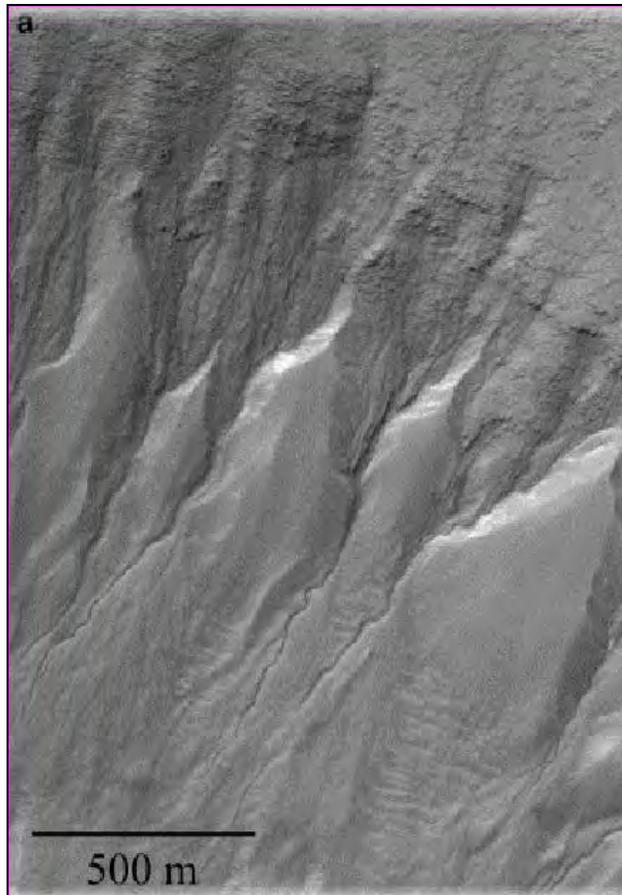


Figura 4.4. MOC2-309. M15-01616

Barrancos en una ladera del Cráter Newton. Ejemplo de canales sinuosos y angostos.
 Crédito: NASA/JPL/Malin Space Science Systems

No. Imagen	Área correspondiente	Coordenadas	No. Barrancos (medidos como sistemas)
M14-01830 Escala gráfica 500 m	Gorgonium Chaos	37.4°S 168.3°W	10
M03-02290		37.45°S 168.3°W	13
M15-01616 MOC2-309	Cerca del Cráter Newton	41°S 163°W	17 22

Tabla 4.1 Longitudes de los barrancos, entre 24 m y 1775 m. Las escalas correspondientes a cada imagen se ven en las figuras 4.2 a 4.4.

4.1.2 Revisión complementaria de imágenes MOC THEMIS, HIRISE Y ESA.

En una etapa posterior de revisó un mayor número de imágenes MOC de la MGS.

Se encontraron barrancos no sólo en cráteres de impacto, sino también en relieves volcánicos, laderas de mesetas, planicies y cañones. También se revisaron imágenes obtenidas por la cámara THEMIS (**T**hermal **E**mission **I**maging **S**ystem) a bordo de la nave Odyssey, la cámara HiRISE (**H**igh **R**esolution **I**maging **S**cience **E**xperiment) de la Misión Mars Reconnaissance Orbiter de NASA y de la Misión Mars Express de ESA. Algunas de estas imágenes corresponden a sitios fotografiados anteriormente por la cámara MOC, pero con la cámara HiRISE, se mejoró con mucho la resolución. En ésta nueva revisión de imágenes también se encontraron barrancos en el hemisferio norte, en latitudes medias, en latitudes muy cercanas al Ecuador y en algunos casos en latitudes casi polares. Pero se confirmó que estos rasgos predominan en latitudes medias.

La existencia de barrancos a diferentes latitudes, en diversas fisiografías y de apariencia relativamente joven, indica que no pudo estar involucrado algún líquido en su formación, al menos no en etapas geológicas recientes ya que, como se ha mencionado, las condiciones ambientales actuales de Marte lo hacen improbable (Cedillo y Durand, 2010).

Se revisó un total de 123 imágenes HiRISE, correspondientes a diferentes latitudes y longitudes de la superficie marciana, con objeto de identificar barrancos. No obstante que se encontraron numerosos barrancos en varias de las imágenes se seleccionó únicamente un total de 35 imágenes: 27 MOC, 7 HiRISE y 1 THEMIS. Se trabajó con más detalle en las 27 imágenes MOC (ver tabla 4.2), por haber más disponibilidad de datos y porque un análisis detallado de todas las imágenes seleccionadas requería de más tiempo. Se seleccionaron imágenes que mostraran barrancos de los hemisferios norte y sur, con latitudes desde casi ecuatoriales a cercanas a los polos, y con diferentes altitudes. La finalidad de esta selección fue identificar las diferentes temperaturas y características de los terrenos en donde ha sido posible la formación de los barrancos.

	MOC2	MOC	Latitud (°)	Longitud E (°)	Longitud W (°)	Nombre de la imagen	Altitud (m)
1	236	M1103185	-37.5 S	189.5	170.5	Depresiones y mesas en capas Gorgonum Chaos	-235
2	271-C	M0900539	-47.9° S	4.1	355.9	Secretos de tierras elevadas del Noachiano. Capas y barrancos	100
3	309	E0202482	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Cráter Newton	-970
4	320	E0302550	-42.4 S	207.8	152.2	Barrancos en el cráter Newton en Sirenum Terra	-330
5	326	R0100126	28.3 N	288.1	71.9	Deslizamiento de terreno en Kasei Vallis	-482
6	327	E1000770	-70.9 S	20.7	339.3	Deshielo primaveral de una masa en movimiento.	878
7	467	R0701709	-70.7 S	1.8	358.2	Deshielo en una ladera del polo sur	880
8	496	R0201138	23.7 N	256	104	Pozos y capas. Tractus Fossae	800
9	680	R1401096	-38.8 S	319.7	40.3	Barrancos con material brillante.	-2300
10	684	R1304663	-39.8 S	158	202	Barrancos en un cráter.r	1000
11	715	M0302294	2.7 N	316.9	43.1	Cabeceras en el cráter Xanthe Cerca de Shalbatana Vallis	-1100
12	751	E1101445	39.08 S	159.07	200.93	Ladera de un cráter con barrancos.	170
13	787	R0903675	-46.6 S	184.3	175.7	Barrancos marcianos	1600
14	814	R1500513	-39.7 S	151.4	208.6	Rasgos tipo barrancos en latitud media.	244
15	1097	S0400877	49.8 N	337.3	22.7	Ladera abarrancada. Acidalia Planitia	-4800
16	1445	S1201001	-33.5 S	152.8	207.2	Barrancos Gallore. Cráter en Terra Cimmeria	1000
17	1466	S1400117	-54 S	22.9	337.1	Ladera noroeste en un crater. Hellas Plantia	1100
18	1505	R1402205	-70.7 S	3	357	Región Sisyphi Spine. Planum.	870
19	1508	R2200733	-44.1 S	34.2	325.8	Geofomas Rabe. Fondo del cráter Rabe.	-230

20	1567-c	Recuadro	0.6 N	304.7	55.3	Cráter Mutch	-610
21	1609	S2300580	-40.4 S	204.7	155.3	Una vista de los barrancos.	600
22	1610	S2300573	13.8 N	225.9	134.1	Flujos del Monte Olimpo	1934
23	1620 (a) 1622.(c) *sub- imagen of MOC	R07-02277	-35.5 S	324.6	35.4	Cráter Hale Barrancos marcianos con depósitos en tonos.	-550
24	S02-00674	S1602714	-33.9 S	200	160		2700
25		M1401830	-37.3	191.7	168.3	Noachiano	74
26		M1501616	-41	197	163	Avalancha en una duna. Cráter Russel.	100
27		E1104033	-39.1	193.9	166.1		260
28		M1500964	-47.8	4.09	355.9		100

Tabla 4.2. Lista de imágenes de la misión MARS GLOBAL SURVEYOR (MGS).

Las imágenes corresponden a latitudes ecuatoriales y casi polares y diversas altitudes. El nombre de la imagen da una idea de las características del terreno en donde se ubican los barrancos.

Nota: La numeración de las imágenes MOC2 y MOC están referidas según información técnica de la cámara, a bordo del orbitador MGS.

Para obtener la altitud de los sitios con barrancos localizados en las imágenes MOC, fue necesario ubicar nuevamente los terrenos en las imágenes HiRISE, debido a que las proyecciones geográficas utilizadas por las misiones espaciales MGS (imágenes MOC) y Odyssey (imágenes HiRISE), eran diferentes y la ubicación de estos sitios con barrancos quedaba desplazada.

Como resultado se encontraron barrancos que se localizan en un rango de latitudes Norte o Sur entre 33° a -71° en un orden de elevaciones de entre -4800 a 2700 metros.

Con respecto a la revisión de imágenes THEMIS cabe destacar que se encontraron barrancos en latitudes muy cercanas al ecuador, pero debido a que finalmente se trabajó con las imágenes MOC (Tabla 4.2) y HiRISE (Tabla 4.3), sólo se menciona el rango de latitudes medias hasta casi polares de los barrancos en esas imágenes. Cabe destacar que, como se reportó en las primeras investigaciones de barrancos marcianos, su distribución predomina en latitudes medias para ambos hemisferios norte y sur. Este hecho es significativo para el modelo que proponemos (capítulo 5) ya que en estas latitudes las condiciones ambientales son más propicias para que se acumule nieve de CO_2 y se produzca la sublimación. Por el contrario, en latitudes ecuatoriales se producirá menos cantidad de nieve de CO_2 y a altas latitudes la sublimación del CO_2 estará más limitada debido a las temperaturas tan bajas. [No obstante, según un modelo más reciente de Cedillo y coautores (2011), en latitudes polares de 75° puede ocurrir la fluidización de sedimentos asociados a CO_2 congelado como el mecanismo de iniciación en la formación de los barrancos, ver anexo 2].

La interpretación que realizamos de las imágenes correspondientes de la tabla 4.3 permitirá hacer una propuesta de clasificación de los barrancos marcianos. Consideramos que al menos esta clasificación sería preliminar, dado que se requeriría un análisis exhaustivo de todos los barrancos para poder dar una clasificación contundente. Ésta es una de las tareas que planeamos hacer en una investigación posterior cuando se tengan nuevas imágenes.

Un aspecto importante es el de la orientación de los barrancos. Unas teorías

sugieren que ésta es un parámetro importante o determinante en la formación de estos rasgos, sin embargo, en la revisión de las imágenes notamos que los barrancos tienen orientación diversa y ésta es independiente de la dirección azimuthal del Sol, hecho que debilita la importancia de este parámetro involucrado en la formación de los barrancos, como se ha propuesto.

Tabla 4.3

Núm./nombre de la imagen HiRISE	Coordenadas	Elevación en Km. (MOLA)	Área de ubicación	Interpretación
PSP_001389_2225 Gullies	Lat., 42.17, Long °E 312.04	-4	Cráter de impacto	Los deslizamientos observados podrían ser el inicio de los barrancos
PSP_001816_1410 Gullies and Arcuate Ridges	Lat., 38.73, Long °E: , 193.99	8 km	Barrancos y montañas curvadas o arqueadas en un cráter. Hemisferio Sur.	A la derecha un barranco sin cabecera. Comienza a muchos metros de profundidad del borde del cráter. Algunos barrancos comienzan en el borde.
PSP_001330_1395 Gullies	Lat, -40.10, Long °E:, 132.28	-2	Cráter de impacto	Barrancos sinuosos a diferentes profundidades en la ladera de un cráter. Morfología lobulada en el área de depósito. Barrancos están inactivos o muy antiguos porque no es clara la profundidad del canal. Cráteres de impacto sobre el abanico
PSP_001368_1400 Gully Apron In Crater	Lat., -39.64, Long E:, 175.97	7-8 km	Cráter de impacto	Un barranco comienza a más profundidad? O se borró por el eyecta? Pequeños cráteres de impacto dentro de la cabecera.
Gullies in Inner Slope of Crater and Exposed Bedrock PSP_001493_2235	Lat., -42.92, Long E: 354.86	-5		Cráter de impacto sobre el abanico. Barrancos angostos con abanicos largos o sin cabecera. Morfología poligonal.
Gullied Trough in Noachis Terra PSP_001691_1320	Lat, -47.46 Long E:, 4.36	*-1,-2 km	Cráter de impacto	Noachis Terra. Barrancos a ambos lados de la depresión rocosa.
Gullies and... Gullies? in Terra Sirenum PSP_001697_1390	Lat, -40.81, Long E: 2.00	-1	Cráter Newton en Terra Sirenum	Canales muy angostos. Barrancos formados a diferente profundidad. Algunos barrancos sin cabecera o sin abanico de depósito. Laderas con barrancos o con relieve plano. Barrancos rectos.
PSP_002291_1335 Gully Grab Bag in Crater Wall in the Terra Sirenum Region Image	Lat, -46.18, Long E: 184.46	2	Cráter de impacto con un barranco	Cráter de impacto sobre un barranco. Edad? Posición-orientación de los estratos: estará relacionada con la forma de los canales, sinuosos o rectos?. En la parte alta hay deslizamientos de terreno de algunos barrancos. Imagen muy compleja.
Fuzzy Faulted Plains PSP_001840_2000	Lat, 19.95, Long E:, 251.41	1	Cráter de impacto. Deslizamientos y barrancos?	Las líneas oscuras se han interpretado como actividad líquida muy reciente. Pero interpretamos que pueden ser deslizamientos que descubren material de otro tono.

SNOWMELT V01229004.

THEMIS (Thermal Emission Imaging System) imagen NASA/JPL/Arizona State University

Lat. -42.985 N
Long 214.659 E

Terra Sirenum

Tabla 4.3.

Lista de imágenes HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment Camera) a bordo de la nave Mars Reconnaissance Orbiter de NASA. La interpretación de las imágenes sugiere que varios procesos han formado los barrancos. Y no puede definirse el origen de éstos ya que exhiben diversidad de morfología en sus tres rasgos característicos (cabecera, canal y abanico de detritos).

Sumado a lo anterior, los barrancos están ubicados en diferentes tipos de terrenos. Estas imágenes HiRISE ofrecen hasta ahora la mejor resolución, sin embargo al parecer surgen más incógnitas que respuestas para resolver definitivamente el origen de estos rasgos marcianos.

4.1.3 Características generales de los barrancos marcianos

En general, los barrancos marcianos exhiben las tres características que tienen los barrancos terrestres: cabecera, canal y abanico. Sin embargo, se identificaron barrancos marcianos con características un tanto diferentes a estos rasgos típicos. Algunos barrancos no tienen cabeceras (figura 4.5a), sólo el canal, en otros sus canales son de mayor o menor longitud (figura 4.5b). También es variable el ancho del abanico de detritos. Algunos barrancos se ven más erosionados que otros (figura 4.5c). Cabeceras muy alargadas. Agrupados y con diferentes longitudes de sus canales (figura 4.5d).

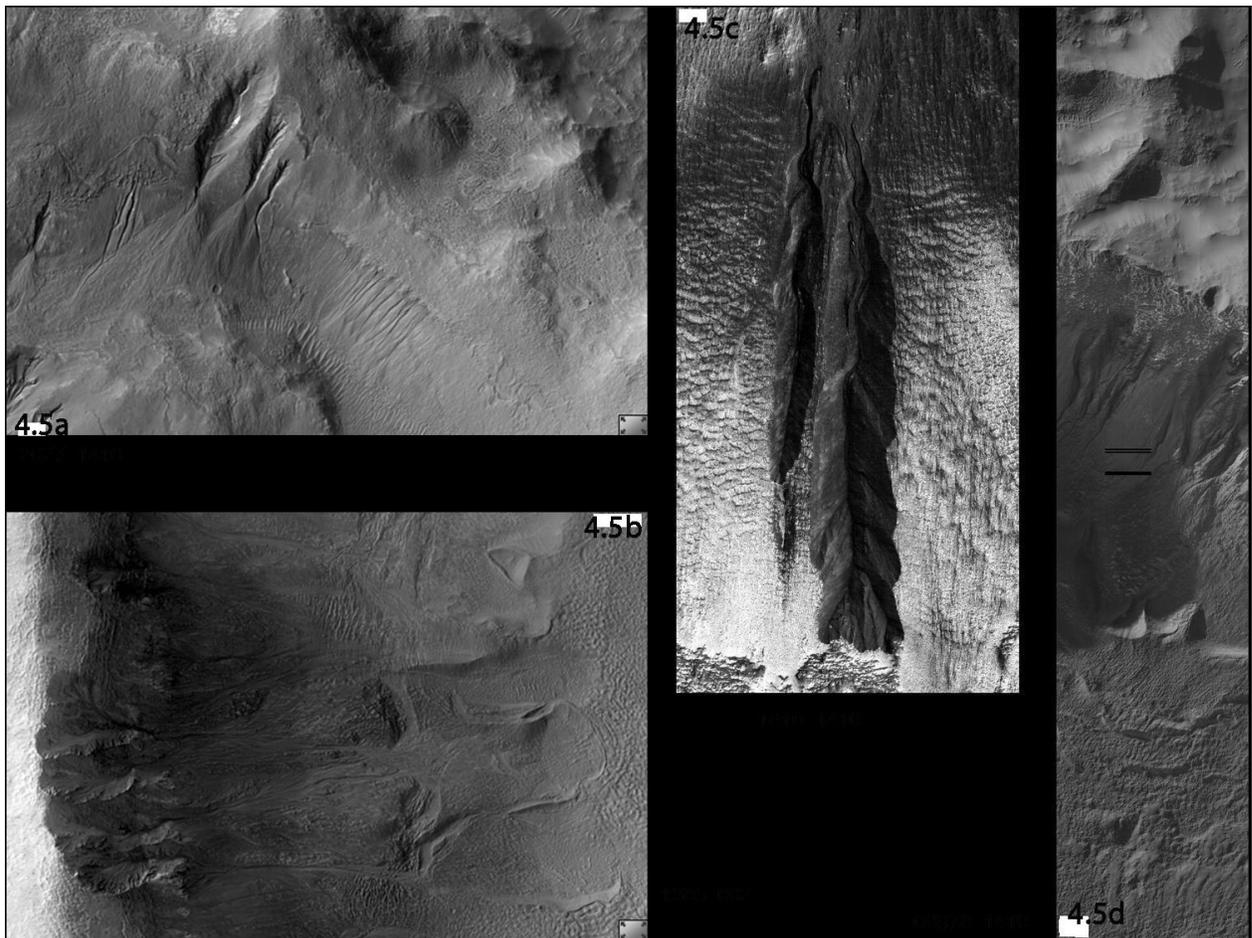


Figura 4.5. Las imágenes agrupadas 4.5 a, b, c, y d muestran diferentes ambientes donde ocurren barrancos con cabeceras alargadas, canales muy cortos con respecto al tamaño sus cabeceras, canales casi rectos y de variadas longitudes.

En la figura 4.6 se aprecian con más detalle los rasgos geomorfológicos, tipo periglacial, cercanos a los barrancos que semejan los terrestres. Pueden observarse estructuras lobuladas, deslizamiento de terreno, estructuras tipo herradura, acumulación de nieve de CO₂ y sublimación de la misma.

El hecho de que los barrancos se hayan formado en ambientes diferentes y de que en la cercanía de muchos se observen rasgos típicos de una geomorfología periglacial permite suponer algunos de los procesos que pueden haber intervenido en su formación. Por ejemplo, ya que el CO₂ existe en Marte en fase de hielo y gas a temperaturas tan bajas, es un buen candidato para involucrar en la formación de los barrancos y rasgos cercanos a éstos, tales como suelos poligonales y estructuras de tipo herradura.

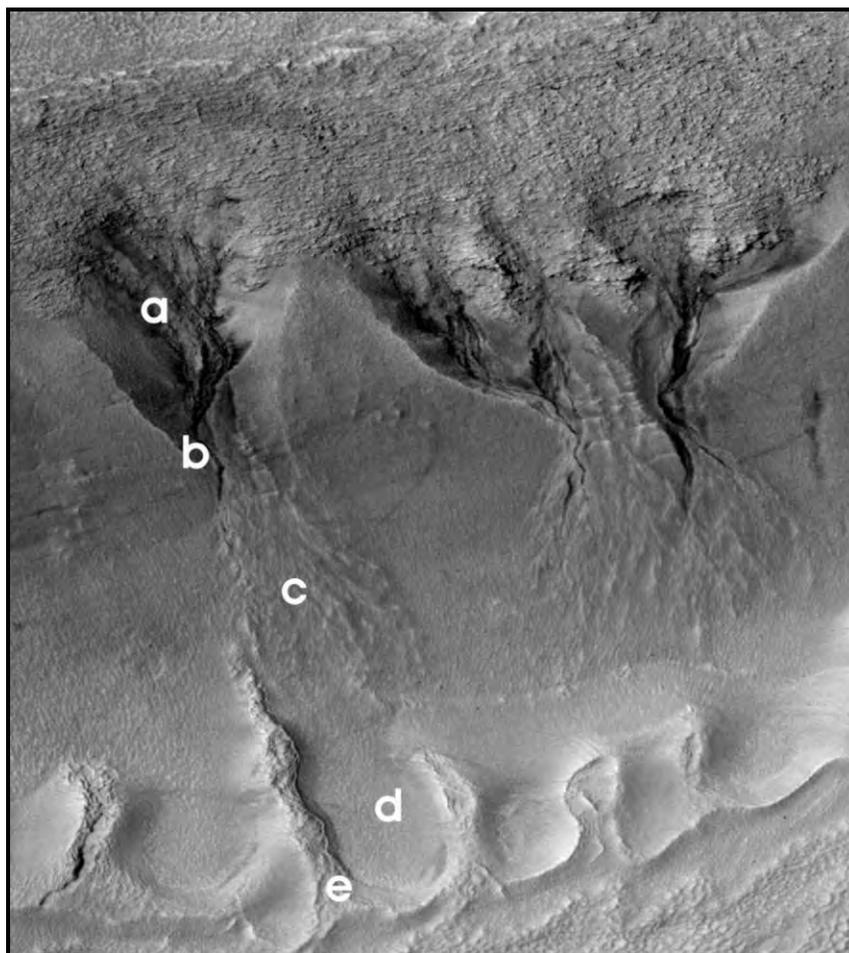


Figura 4.6 Las letras a,b, y c son las partes que forman un barranco típico: cabecera, canal y abanico. Esta imagen muestra rasgos propios de relieve periglacial en la base de los abanicos de detritos, tales como los tipos herradura (d) estructuras lobuladas (elevaciones curvadas), acumulación de nieve de CO₂ (e). Imagen PSP_006760_1370. Barrancos en interior del cráter

Varios autores han reportado estos tipos de morfologías. Por ejemplo, Lucchitta y colaboradores (1992) citan los barrancos de dos regiones: Coprates (14.8 S, 65W, elevación 3 km) y Ius Chasma (6.9°S, 85.8W, elevación -3 km), ambos parecidos a ambientes terrestres alpinos y desérticos. Baker (2003) cita rasgos del tipo glaciares de hielo en las laderas interiores de cráteres de impacto. Afirma que son evidencias de hielo de agua por la semejanza con los rasgos glaciares terrestres. Berman y colaboradores (2005) localizaron cordilleras curvadas en numerosos cráteres de impacto preferentemente a latitudes medias y al parecer hay casos en que estos rasgos están asociados a los barrancos. El emplazamiento de material en el fondo de los cráteres quizás tuvo lugar en episodios o ciclos de actividad durante alta oblicuidad del planeta. El material involucrado pudo ser agua, hielo, polvo y detrito rocoso proveniente de las paredes de los cráteres. La asociación entre esos dos tipos de rasgos es muy compleja y pudo formarse durante pocos millones a decenas de millones de años.

Respecto a la pendiente que tienen las laderas con barrancos marcianos, se considera de gran importancia conocer cuál es el rango en que se forman éstos, ya que con material fluidizado podrían formarse barrancos a ángulos variados, desde muy bajos hasta mayores al ángulo de reposo ($\sim 33^\circ$). (Ver tabla 5.1 del siguiente capítulo).

Hasta ahora se han calculado algunas pendientes de las laderas con barrancos, pero aún no está disponible una cartografía general a pequeña escala de la superficie marciana. Por ejemplo, Dickson y colaboradores (2007) utilizaron datos del altímetro MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) de la misión MGS, y reportaron que la mayoría de las agrupaciones de barrancos en latitudes medias del hemisferio sur se encuentran sobre laderas con inclinaciones promedio de 26.5° . En su análisis no encontraron alguna correlación entre la inclinación y la altitud u orientación de los barrancos.

Los barrancos marcianos exhiben una morfología diversa y compleja, parte de ésta comprende flujos de detritos como abanicos lobulados y unos rasgos tipo circo en la bases de varios escarpes.

Respecto a la edad de estos barrancos, puede aplicarse el método utilizado para superficies planetarias sólidas o sea el grado de densidad de cráteres de impacto apreciable en la superficie. Con este método puede inferirse que debido a la reducida cantidad de cráteres de impacto que se han encontrado sobre los barrancos, estos últimos deben haberse formado en una etapa geológica reciente. Para poder fecharlos de manera confiable sería necesario hacer un análisis de muestras rocosas, lo cual solo es posible en parte, ya que hasta ahora las naves espaciales llevan instrumentos que realizan algunos análisis pero no son 100% confiables, porque únicamente pueden analizar rocas superficiales o muy cerca de la superficie.

- **4.2 Barrancos terrestres. Volcán Nevado de Toluca.**

Con el fin de conocer los procesos que pudieron o pueden intervenir en el origen y desarrollo de los barrancos marcianos y hacer un estudio comparativo con barrancos terrestres, se seleccionó la cumbre del volcán Nevado de Toluca por tener un clima frío y morfología periglacial, pues en Marte numerosas áreas con barrancos exhiben una morfología similar.

Área de estudio

Situación geográfica del volcán Nevado de Toluca o Xinantécatl (figura 4.7).

El Nevado de Toluca es un estratovolcán que se localiza en las coordenadas lat: 19°06'30"N, long. 99°45'30"W, (Arce *et al.*, 2003) a una altitud de 4680 m s.n.m., (Arce *et al.*, 2003; García-Palomo *et al.*, 2002) en el Estado de México. Su distancia a la ciudad de Toluca (capital del Estado de México) es de 21 km, la distancia a la Ciudad de México es de 80 km (Arce *et al.*, 2003).

La temperatura media anual es de 3.6°C, la mínima de 2.2°C y la máxima de 4.8°C; desde los 4000 m de altitud y hasta la cima del cráter, (Villers y López, 1995) la precipitación varía de 1000 a 1500 mm anuales.

Clima templado semifrío con temperaturas de 5°C a 12°C se presenta a altitudes entre 3300 y 4000 msnm.

El clima es frío E(T)H, en la cima del volcán Xinantécatl la temperatura media

anual oscila entre los 0° y 4° C .Fuente. (CETENAL-UNAM, 1970, Carta de Climas, Esc. 1: 500,000)



Figura 4.7. Imagen del Volcán Nevado de Toluca. Área de estudio. En esta área de estudio se seleccionaron algunas laderas exteriores e interiores del cráter y se compararon formas de relieve de barrancos análogas la morfología marciana.

La morfología del volcán muestra los efectos de los avances glaciares que ha experimentado durante el periodo Holoceno (Heine, 1988, citado en Garcia-Palomo *et al.*, 2002).

En la historia eruptiva de este volcán ha tenido erupciones violentas acompañadas de flujos piroclásticos, lahares, avalanchas, caída de cenizas y pómez (Aceves-Quesada *et al.*, 2006), destacan las tres erupciones siguientes:

la primera ocurrió hace 28.000 años A.P., y fue de tipo vulcaniano. La segunda erupción hace 24.000 años seguida de una tercera hace 11.600 años, ambas de tipo pliniano (Arce y colaboradores 2003).

Posteriormente a la tercera erupción, hace ~10,500 años el volcán experimentó

nueva actividad pliniana con eventos piroclásticos y columnas plinianas; la caída de material de éstas cubrió un área de 2000 km².

La historia eruptiva nos permite estimar que los barrancos del volcán Nevado de Toluca deben tener una antigüedad menor a 10, 000 años (Arce y colaboradores 2003).

Este ambiente tiene algunas condiciones propicias para permitir la comparación de formación de barrancos. Estas condiciones son el clima frío, sus características volcánicas (pues como se citó en el capítulo 1 existen barrancos marcianos formados en terrenos volcánicos) y la morfología propia de ambientes periglaciares.

Los barrancos que se seleccionaron en el volcán Nevado de Toluca muestran un área de depósito o abanico similar a la de algunos barrancos marcianos (figura 4.8a). Se observó que el detrito depositado al pie de la ladera exterior del Volcán Nevado de Toluca (altitud de entre 4100 y 4400 metros) es de tamaño variado, desde centímetros a rocas grandes, aunque a lo lejos se aprecia como material fino (figuras 4.8.b, 4.9 y 4.10). Se destaca este hecho debido a que algunos abanicos marcianos parecen estar formados por material fino, pues en las imágenes tienen este aspecto. Sin embargo, consideramos que en algunos casos el efecto es erróneo porque los barrancos marcianos han sido fotografiados desde gran altura (~400 km), para las imágenes MOC, en el año 1997.



Figura 4.8a. Volcán Nevado de Toluca. Abanicos de detritos con apariencia de material fino en parte de la ladera exterior del cráter y a ~4100 mts de altitud. Foto. Héctor Durand. Año 2006. Ladera exterior del cráter (NW) (lat:19°7', long 99' 46'). Altitud: 4100-4400 m



Figura 4.8b. Volcán Nevado de Toluca. Abanicos de detritos a ~4100 mts de altitud. Foto. Yolanda Cedillo. Año 2008. (lat:19°7', long 99' 46'). Ladera exterior del cráter (NW).



Figura 4.9. Volcán Nevado de Toluca. Vista cercana del material que compone uno de los abanicos de detritos de la imagen 3.7. Foto: Yolanda Cedillo, año 2006.



Figura 4.10. Volcán Nevado de Toluca. Ladera exterior del cráter. Abanicos de detritos con apariencia de material granular fino. Vista de frente. Foto Yolanda Cedillo, año 2008.

Dentro del cráter del volcán Nevado de Toluca existen dos barrancos que tienen longitudes de 500 m y 250 m, y en la ladera norte exterior se midió la longitud de otro barranco, siendo de 157 m (figura 4.11). Estos valores son análogos a la mayoría de los medidos en las imágenes de Marte. Comparamos estos datos con las longitudes de los barrancos marcianos que medimos y cuyo rango es de 24 metros a 1775 metros. El diagrama de la figura 4.12 muestra que las longitudes de los barrancos observados en el Nevado de Toluca son comparables con las longitudes de una gran parte de los barrancos marcianos.



Figura 4.11a Barranco en el interior del cráter del Volcán Nevado de Toluca.
Foto: Yolanda Cedillo. Año 2006



Figura 4.11b Dos años después el mismo barranco de la figura 3.9a no parece mostrar cambios en su morfología.
Foto: Yolanda Cedillo. Año 2008.

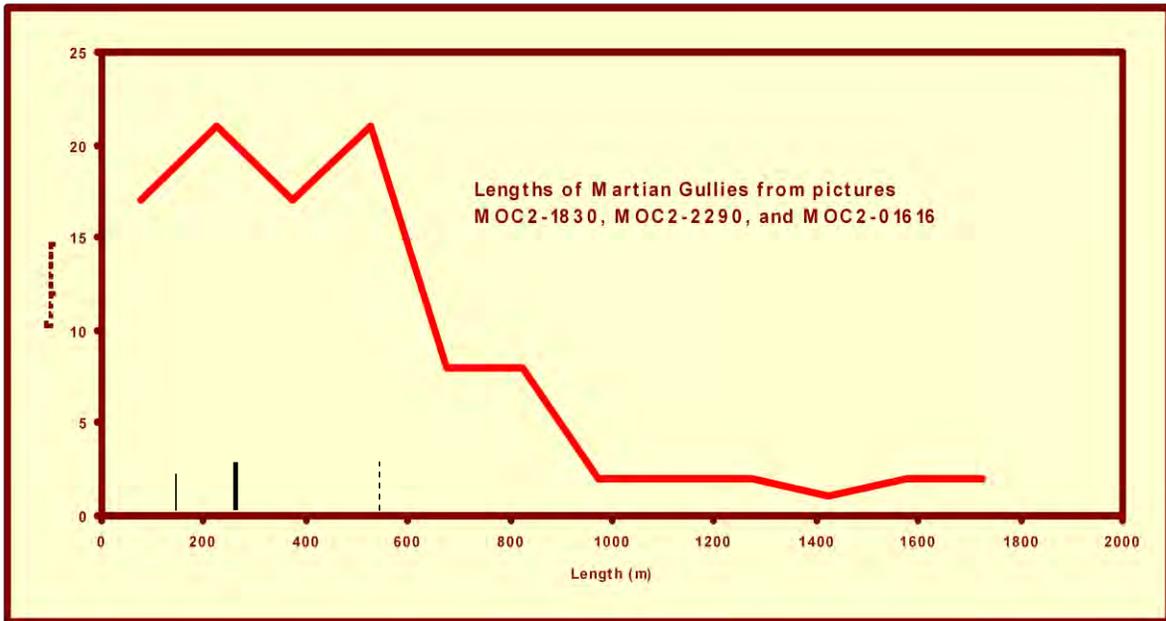


Figura 4.12. Diagrama de longitud de barrancos marcianos. Las barras gruesa y punteada se refieren a la longitud de los barrancos medidos en el Nevado de Toluca. La barra delgada es la longitud del barranco en la ladera norte del volcán el cual puede verse en la figura 4.11b.

Finalmente comparamos la forma de las características de los barrancos del Nevado de Toluca con las encontradas en los barrancos marcianos. Un ejemplo se presenta en la figura 4.13a y 4.13b, donde se identificaron abanicos de detritos similares a algunos marcianos. También observamos que el material rocoso puede aparentar material muy fino si es visto desde una distancia de algunos kilómetros. Este hecho, en el caso de Marte, puede causar interpretaciones un tanto erróneas al suponer que el material de los abanicos de detrito es fino.



Figura 4.13a. Interior del cráter del Volcán Nevado de Toluca. La ladera tiene apariencia de estar formada por material fino. Este tipo de relieve semeja a alguna ladera marciana. En este caso, la ladera fue formada por procesos con intervención de agua. Foto: Yolanda Cedillo. Año 2006.



Figura 4.13b. Interior del cráter del Volcán Nevado de Toluca. La misma ladera tiene apariencia de estar formada por material fino sin cambios radicales aparentes. Foto: Yolanda Cedillo. Año 2008.

El estudio comparativo realizado en la parte alta del volcán Nevado de Toluca confirmó que la morfología de barrancos que seleccionamos en este trabajo y muchos barrancos marcianos, tienen longitudes similares. Se infiere que estos rasgos pueden formarse por procesos diferentes y sin intervención de líquido, en Marte. Se observó que en general, también hay similitud de la morfología periglacial de ambos ambientes, terrestre y marciano.

El siguiente capítulo comprende el modelo que proponemos para intentar explicar el origen de los barrancos en cuestión. Se verá que algunos puntos que otros modelos no han podido solucionar, podrían quedar resueltos con este nuevo modelo.

Capítulo 5. Modelo “Fluidización gaseosa del CO₂”, experimentos y analogías con barrancos marcianos.

5.1 Modelo propuesto “Fluidización gaseosa del CO₂”.

- Como se vio en el capítulo anterior, los barrancos marcianos muestran complejidad en su morfología y los modelos propuestos anteriormente sólo podían explicar parcialmente su posible origen así como los procesos que pudieran haber intervenido en su formación.

- El modelo que se propone en este capítulo intenta explicar cómo se han formado muchos de los barrancos marcianos.

- Retomando las ideas de la carencia de condiciones ambientales adecuadas y recientes para la existencia de agua líquida en Marte, los drásticos cambios de temperatura, la acumulación de material seco y de nieve de CO₂, entre muchos otros aspectos, el modelo en cuestión no considera la intervención de algún líquido. A continuación, se describe el modelo que nombramos de “fluidización gaseosa del CO₂” ya que consideramos que este proceso es el principal formador de estos barrancos.

- - *Durante el invierno marciano se acumula nieve de CO₂ y polvo transportado por los vientos, sobre las laderas marcianas.*
 - *Durante la primavera marciana, y debido al incremento de temperatura diaria o estacional, la nieve carbónica comienza a sublimarse debido al calor del Sol, originando que la mezcla de CO₂ y polvo se fluidize y se desplace ladera abajo por gravedad.*
 - *Los barrancos pueden formarse en etapas diarias, anuales, estacionales, o en cada cambio de oblicuidad del planeta.*

Podría esperarse que con base en el modelo planteado, el CO₂ no se acumularía en zonas ecuatoriales, debido a que la temperatura sería inadecuada

para mantenerlo como sólido o gas. Sin embargo, esto puede explicarse con la oblicuidad del planeta. Esto probaría que en oblicuidades altas el CO₂ se acumularía en la zona ecuatorial y al formarse los barrancos “repentinamente” por erosión rápida, se forman canales relativamente angostos. Aquí se pone de manifiesto que, de acuerdo con los procesos geomorfológicos terrestres, cuando un fluido erosiona rápidamente se forma un canal angosto. Por el contrario, si la acción erosiva es lenta, se formaría un canal ancho. En el caso de Marte, el CO₂ fluidizado equivaldría precisamente a un fluido.

En las pendientes de los cañones, cráteres y otros rasgos geomorfológicos marcianos el viento deposita polvo y arena, si este material se desliza pendiente abajo erosionará la ladera y podrá formar en ella barrancos como los observados. En esencia ésta es la teoría de los flujos secos propuesta por Treiman (2003).

Nosotros sugerimos que cuando la arena es depositada sobre una pendiente, ésta no se deslizará a menos que la pendiente sea mayor al ángulo de reposo (35°) o muy cercano a éste. Esto se debe a la fricción que hay entre los granos de arena que les impide moverse (figura. 5.1a). Sin embargo, muchos de los barrancos encontrados en Marte están en pendientes menores que la pendiente de reposo (Dickson *et al.*, 2007), pero si desde el interior de la masa de arena se inyecta CO₂ o cualquier otro gas, los granos de arena van a ser levantados (figura 5.1b) y al fluir el gas entre ellos ya no van a tener contacto unos con otros, permitiendo que la mezcla (arena+gas) fluya como un líquido en cualquier pendiente.

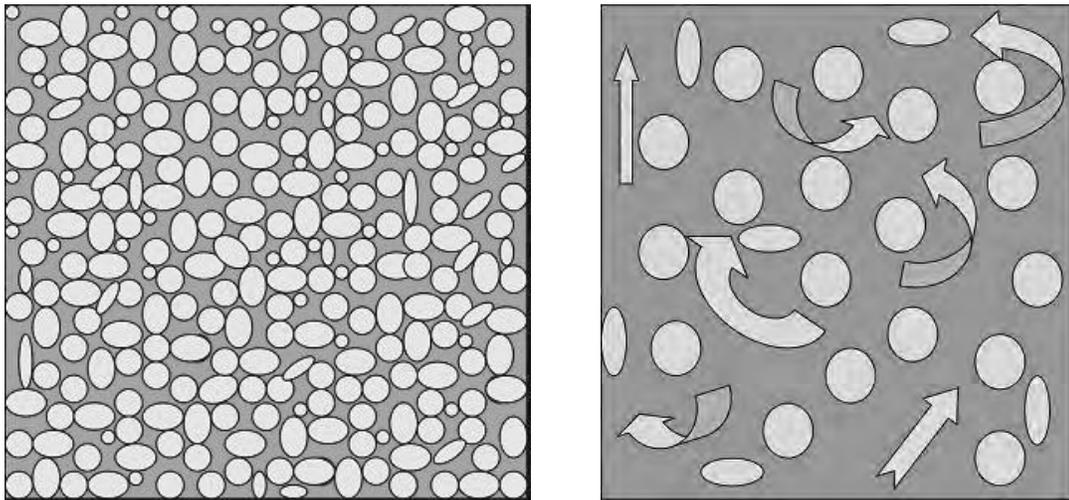


Figura 5.1.a y figura 5.1.b

El esquema del lado izquierdo representa granos de arena acumulados en una ladera con muy baja pendiente, por lo que no tienen movimiento. Pero si desde el interior de la masa de arena se inyecta CO_2 o cualquier otro gas, los granos de arena se separan y son levantados (esquema lado derecho) y al fluir el gas entre ellos ya hay contacto entre ellos, entonces la mezcla (arena+gas) fluye como un líquido en cualquier pendiente.

La idea general de nuestro modelo es que en una ladera dada en que ocurre la fluidización, la ladera va a ser erosionada más rápidamente o más lentamente dependiendo de la textura y dureza del material. Por ejemplo, en dunas de arena los barrancos se formarán con unos pocos eventos de fluidización, mientras que laderas de roca dura quizás necesiten numerosos eventos para producirlos. Estos deslizamientos erosionan el terreno formando el barranco y, por ser recurrentes con periodicidades diarias, anuales o en cada cambio de la oblicuidad del planeta, quizá los barrancos tengan una evolución en el tiempo creciendo y haciéndose más profundos. El material desplazado se deposita al pie de los escarpes y forma un abanico de detritos que, al acumularse, modelan estructuras del tipo de los lóbulos de los glaciares terrestres (figura 5.2).

En la figura 5.2 se representan en perfil los rasgos que componen la estructura de los flujos fluidizados, según este modelo. Los cuatro diagramas muestran las etapas del deslizamiento, la separación y orden final del material según su densidad. Diagrama 1: acumulación del material (arena, hielo de CO_2 y hielo de H_2O) sobre la ladera. Diagrama 2: deslizamiento y separación del material según

su densidad, primero el más denso o sea la arena, después, sobre ésta el hielo de CO_2 , y en la parte superior, el hielo de H_2O . Diagrama 3: los materiales han quedado separados y en el diagrama 4 se presenta el final de ésta separación; el hielo de CO_2 se ha sublimado [a -130°C que es su temperatura de sublimación (Hoffman, 2001a)]. Las mismas etapas descritas en estos diagramas pueden notarse en la imagen de la figura 5.3.

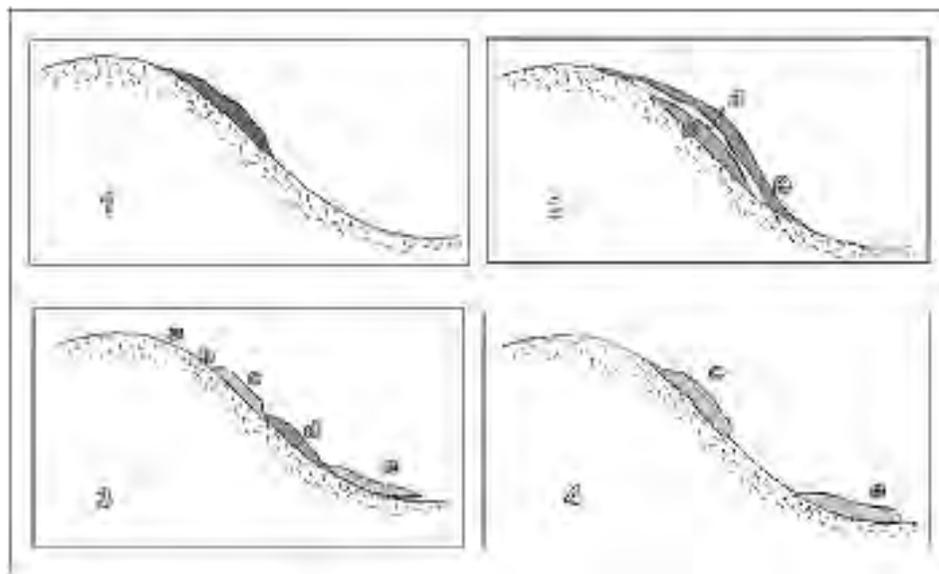


Figura 5.2. Etapas de la formación de un barranco

La etapa 1 representa la acumulación de material rocoso con hielo de CO_2 y H_2O en una ladera. En la etapa 2 se produce el deslizamiento y separación de los materiales previamente acumulados. La etapa 3 muestra la deposición de esos materiales y en la etapa final ocurre la eliminación del CO_2 .

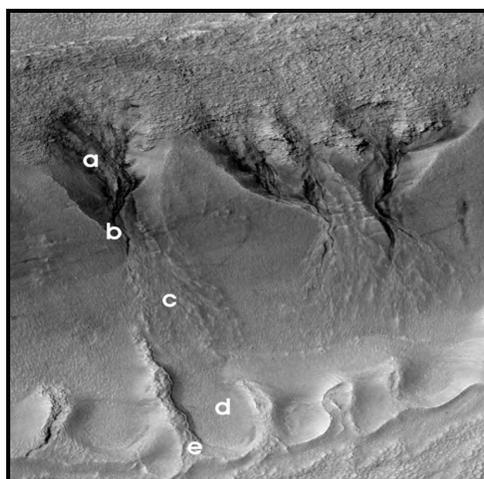


Figura 5.3. Las etapas en formación de un barranco descritas en la figura 5.2, equivalen a los rasgos de la imagen de un barranco sobre la superficie marciana.

NASA/JPL/University of Arizona. PSP_006760_1370 Terra Sirenum

5.2 Experimentos. Formación de barrancos marcianos.

Los objetivos al realizar experimentos en laboratorio fueron producir la fluidización de la arena por gas y tratar de reproducir estructuras tipo barrancos. Para esto se efectuaron dos tipos de experimentos:

- 1) con inyección de aire
- 2) con hielo de CO₂.

5.2.1 Experimento 1. Con inyección de aire

En el laboratorio, el aire se utilizó como el sustituto del CO₂ gaseoso que se desprende al sublimarse el hielo carbónico en Marte.

Primero se construyó una ladera con arena volcánica seca y con inclinación cercana al ángulo de reposo (33°). A 4 cm de profundidad se insertaron tubos de 6 mm de diámetro, perforados a lo largo de su superficie cada 9 mm, y se colocaron paralelos a la superficie de la ladera, (figuras 5.4. y 5.5) Por estos tubos se inyectó aire que burbujeaba en la arena, facilitando que esta se fluidizara y fluyera como un líquido por la pendiente.

En este experimento se reprodujo la formación de los barrancos marcianos utilizando material seco con aire inyectado para formar flujos granulares.



Figura 5.4. En el experimento de la formación de un barranco se observa que el material seco se fluidiza cuando se le inyecta aire.



Figura 5.5. Experimento de la formación de un barranco. Se produce la fluidización durante la inyección de aire dentro del material granular seco. En la

mayoría de estos experimentos se formó el sistema de los barrancos

Experimento adicional variando ángulo de inclinación.

El modelo de flujos granulares finos (Treiman, 2003), que básicamente son avalanchas de polvo, requiere que el material granular se encuentre en una ladera con el ángulo de reposo o mayor mientras que algunos barrancos marcianos se encuentran en laderas con ángulos mucho menores al ángulo de reposo. Para probar si con el modelo de fluidización del CO₂ se formaban barrancos con laderas inclinadas a estos ángulos menores, se realizaron experimentos complementarios variando el ángulo de la ladera desde 10° hasta 35°. Se colocó arena formando una pendiente. Se varió la pendiente midiendo el ángulo θ en cada ocasión y se fotografió cada resultado (figura 5.6). Luego sobre la fotografía se midió el largo del abanico desde el final de la zona de burbujeo hasta la parte mas baja del abanico. Cuando ya no hay más deslizamiento de arena, o sea cuando se produce una estabilidad, se forma dentro de la cabecera del barranco una zona horizontal en la cual el aire inyectado sigue burbujeando, aunque ya no produce ningún efecto de deslizamiento. A ésta le nombramos *zona de burbujeo*. El largo del abanico L se normalizó al largo de la zona de burbujeo L_0 . Los resultados pueden verse en la tabla I y la figura 5.7. El largo normalizado en función del ángulo de inclinación se ajusta con la siguiente función:

$$\frac{L}{L_0} = 0.0038 \theta^2 - 0.0134 \theta$$

donde θ es la inclinación en grados.

El resultado de este experimento es que la fluidización provoca deslizamiento del material aún con ángulos pequeños (entre 16°y 20°) muy alejados del ángulo de reposo y que el largo del abanico de detritos es función cuadrática del ángulo de inclinación.



Figura 5.6

Se presentan laderas con diferente ángulo de inclinación. A mayor inclinación que (a partir de los 16° en la pendiente de la ladera), se produce deslizamiento del material y se forman los rasgos del barranco. Los abanicos se han formado por una secuencia de flujos. Esta morfología es similar a la observada en imágenes de numerosos barrancos marcianos.

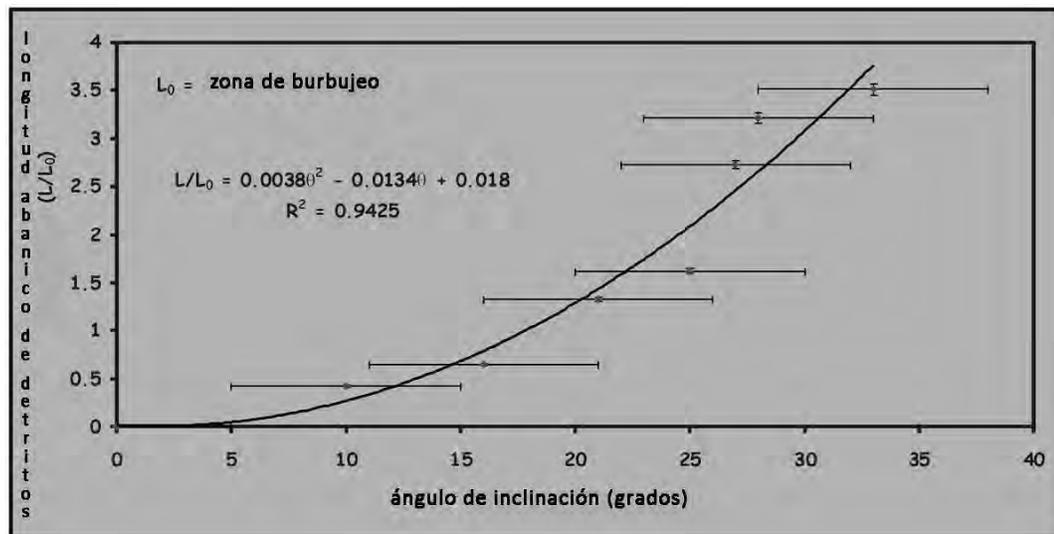


Figura 5.7

Variando el ángulo de inclinación de una ladera se forman los rasgos del barranco. Con los

experimentos descritos se revela que la fluidización produce el deslizamiento del material aún con ángulos pequeños (entre 16° y 20°) con relación al ángulo de reposo y que el largo del abanico de detritos es función cuadrática del ángulo de inclinación.

Tabla 5.1.

Núm. Imagen	Ángulo de inclinación de la ladera	L/L0
608	0	0
609	10	0.42
610	16	0.65
612	21	1.33
611	25	1.62
613	27	2.73
614	33	3.51

Las columnas corresponden a: la secuencia de fotografías de la figura 5.7., al ángulo de inclinación de cada ladera formada con material granular seco, y a los resultados después de haberse formado los flujos. Los resultados indican el largo de los abanicos de detritos formados en los diferentes ángulos de inclinación de la ladera.

5.2.2. Experimento 2. Con hielo seco (CO₂)

Se hizo un experimento similar al primero, pero en lugar de inyectar aire se colocó CO₂ sólido en fragmentos (hielo de CO₂ o hielo seco) bajo la arena, dejando que se evaporara (figura 5.8a). Desde el primer momento no se pudo alcanzar el ángulo de reposo en la parte que tenía el hielo seco ya que la arena tendía a deslizarse por el efecto de fluidización del dióxido de carbono sublimado. Posteriormente, se comenzó a colapsar el material y a formarse la estructura de un circo en la parte superior de la ladera y unos surcos laterales de poca profundidad. No se obtuvo algún canal entre la cabecera y el material desplazado.

La causa por la que no se formó el barranco típico puede deberse a lo difícil que es simular por completo las condiciones del ambiente marciano.

Sin embargo, algunos barrancos marcianos tampoco muestran un canal entre

la cabecera y el abanico de detritos. En el barranco marciano de la figura 5.8b, hay un parecido con la estructura obtenida en el experimento de la figura 5.8a.



Figura 5.8a

Experimento adicional en el que se mezcló hielo de CO_2 . Únicamente se formó una amplia cabecera y se produjo deslizamiento del material. Aunque no se obtuvo algún canal puede asumirse que la fluidización del dióxido de carbono contribuye a la formación de estructuras similares a los barrancos.

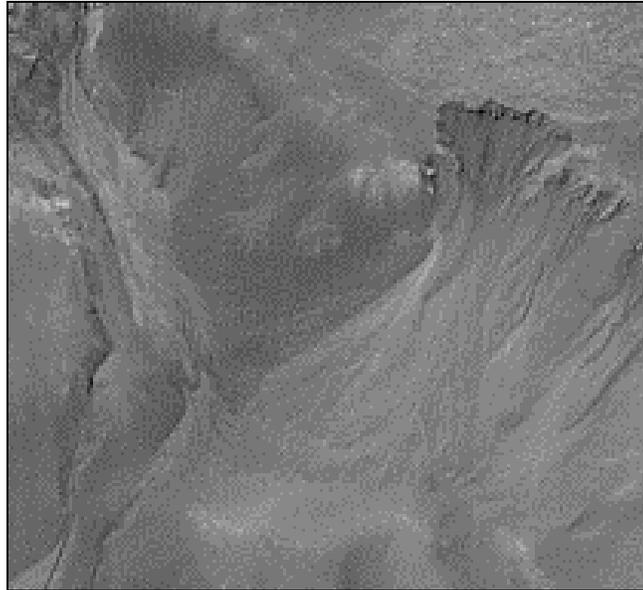


Figura 5.8b. Un barranco marciano con forma inusual. Enseguida de la cabecera se observa el abanico de detritos, sin evidencia de un canal entre ambos rasgos. En este barranco hay un parecido con la estructura obtenida en el experimento de la figura 5.8a.

En otro experimento que se realizó se utilizaron 2 muestras de hielo seco (recipiente 1 y recipiente 2), se midió la velocidad de sublimación del CO_2 sólido a dos temperaturas: ambiente (20°C) y -16°C . Se colocaron 137 g del CO_2 sólido en recipientes cilíndricos abiertos al aire permitiendo que se evaporaran. El resultado de este experimento fue que la velocidad de sublimación es de $1.4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ a 20°C y $1.18 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ a -16°C . Con los resultados obtenidos en este experimento, se puede ver fácilmente que un cuadrado de $100 \times 100 \text{ m}$, en Marte, gasificará del orden de 42 toneladas métricas por hora, lo cual consideramos es suficiente gas para fluidizar el terreno.

Los detalles de estos dos últimos experimentos se presentan a continuación:

Tiempo de sublimación del CO_2 en los recipientes A y B: 10:31 – 16:50 6 H 19 min = 22740 seg.

Debido a que la emisión del CO_2 ocurre por la tapa superior del cilindro, entonces la superficie de éste es:

$$S = \pi \cdot r^2$$

S = Superficie tapa superior

r = radio del cilindro

Para calcular la tasa de sublimación del CO_2 se aplicó la ecuación:

$$T = \frac{M}{t \cdot S}$$

Donde:

T = Tasa de sublimación

M = Masa

t = Tiempo

s =superficie del recipiente

Recipiente "A"

$$r = 3.7 \text{ cm} = 0.037 \text{ m}$$

$$s = 4.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\frac{0.137 \text{ kg}}{43 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times 22740 \text{ s}}$$

$$= 1.4 \times 10^{-3} \text{ kg /m}^2/\text{s} \quad \text{a } 20^\circ\text{C}$$

Recipiente "B"

$$r = 3.7 \text{ cm} = 0.037 \text{ m}$$

$$s = 4.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\frac{0.112 \text{ kg}}{4.185 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times 22740 \text{ s}}$$

$$= 1.1768 \times 10^{-3} \text{ kg /m}^2/\text{s} \quad \text{a } -16^\circ\text{C}$$

Recipiente A		Recipiente B	
Colocado a temperatura ambiente		Colocado en el congelador	
Peso	137 gr.	Peso	137 gr.
Temperatura	20°C	Temperatura	-16°C
Diámetro	7.4 cm	Diámetro	7.3 cm

A baja temperatura se sublima menos masa por unidad de área por unidad de tiempo. Se puede calcular la sublimación del hielo en un hueco de barranco marciano (125 Kg. x seg.)

Experimento con CO_2 .

06-abril-06 Hora	Se colocó hielo de CO_2 en dos recipientes.
9:55 am	Se colocó una muestra de hielo de CO_2 dentro de un congelador. Otra muestra se dejó a temperatura ambiente.
10:00	Recipiente 1.-Se colocaron ~3 kg del hielo bajo la arena. Se

	pretendió formar una elevación pero al contacto con la arena, el hielo se distribuye en un área mayor y baja la elevación. Recipiente 2.-Se colocaron ~250 grs. de hielo y se cubrió con arena.
10:31	Se tomó la temperatura de ambos recipientes. Recipiente 1: 20°C y recipiente 2:-16°C.
11:20	Se han formado pequeñas concavidades y junto a la pared de la caja hubo un derrumbe.
17:10	Recipiente 1.- se observan bordes izquierda y derecha con poca humedad. Recipiente.2- Se observan algunos deslizamientos y un canal en el centro.
18:40	Se evaporó totalmente el hielo del recipiente "A" (a temperatura ambiente)

R
esumie
ndo los

resultados de la fase experimental diremos que el efecto que resulta tanto al inyectar aire, como enterrando el hielo seco, es que la arena se comporta como un líquido y fluye ladera abajo, formándose en su mayoría las tres partes características de un barranco: cabecera, canal y área de depósito o abanico.

Cabe señalar que numerosos barrancos marcianos tienen variantes en su estructura que también se explican con nuestro modelo (Cedillo y Durand, 2010). Encontramos barrancos con canales cortos, cabeceras de diferente ancho, abanicos largos y abanicos cortos.

Un resultado más de los experimentos es que las estructuras que se formaron en el laboratorio son comparables con los barrancos marcianos, como se verá en la siguiente sección.

5.3 Analogías entre barrancos experimentales y barrancos marcianos.

En esta sección se presentan similitudes encontradas entre los barrancos que produjimos con aire en el laboratorio y los barrancos marcianos.

Comparando ambos, se aprecian varias similitudes como canales angostos y sinuosos, huecos anchos, abanicos anchos, angostos y lobulados, similares a los que exhiben varios barrancos marcianos.

En las figuras 5.9, 5.10 y 5.11, el barranco experimental formado con

inyección de aire, se presenta al lado izquierdo y a la derecha el barranco marciano. En la figura 5.9 se observa claramente la cabecera y el abanico formados en el barranco del experimento. El abanico tiene forma lobulada y, sobre éste, canales angostos similares a los formados sobre el barranco marciano. El barranco marciano de este ejemplo se localiza a una latitud media de 42.51°N , 312.03°E y a una altitud de -3.582 metros bajo el datum. Se destaca la forma de canal sinuoso, ya que en una de las teorías que favorecen al agua como formadora de los barrancos se argumenta que la sinuosidad de los barrancos marcianos es evidencia de la intervención de agua. Esta aseveración la consideramos dudosa, ya que en material fluidizado como el de nuestros experimentos se formaron estructuras sinuosas similares.

En el ejemplo de la figura 5.10 se formó un hueco amplio con deslizamientos del material en varias etapas y canales angostos sobre el abanico. En los barrancos marcianos se han observado rasgos que sugieren que también se han formado en etapas. En este ejemplo, el barranco marciano está situado a una latitud media de -39.7°S , 151.4°E y a una altitud de 244 metros. Es importante enfatizar la diferencia de altitud, en el caso anterior y en éste, a la que se han formado los barrancos y, por lo tanto, también diferentes ambientes climáticos, con temperaturas oscilan en decenas de grados centígrados.

En la figura 5.11 se formó un barranco con un hueco amplio. Tanto en el barranco marciano como en el barranco del experimento se formaron rasgos arborescentes en el hueco. Este sistema de barrancos se encuentra en latitud alta de -70.9°S , 20.7°E y a una altitud de 878 metros. Nuevamente se infiere que en diversas latitudes, aun en las cercanas a los polos.

Finalmente, la figura 5.12 evidencia que en el barranco experimental, el abanico de detritos se forma por una secuencia de varios flujos y la cabecera amplia es muy similar a la de los barrancos marcianos de la imagen adjunta.



Figura 5.9. La imagen del lado izquierdo pertenece al barranco formado en laboratorio con inyección de aire. Al lado derecho se observa un barranco marciano similar al obtenido con los experimentos. La imagen HiRISE No PSP_001 389_2225 fue proporcionada por el Center for Planetary Studies de Smithsonian Institution



Figura 5.10 Barranco similar MGS. MOC2-814, año 2004
 El barranco experimental (lado izquierdo) se formó al inyectar aire dentro de la ladera. Se observa que el abanico se creó por una secuencia de flujos.



Figura 5.11 Barranco similar. Imagen MGS MOC2-327, 04 Abril 2003.

Al igual que los anteriores casos el barranco del lado izquierdo formado por inyección de aire, en el laboratorio, muestra rasgos semejantes a los que se observan en algunos barrancos marcianos.

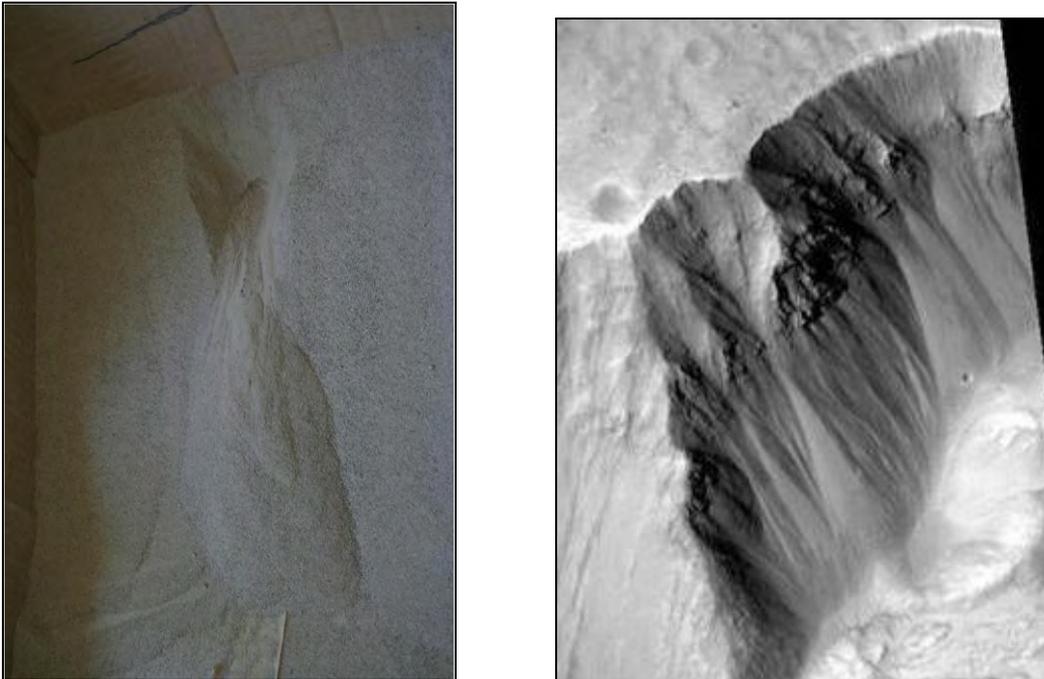


Figura 5.12

M07-01689 Long.18° W, lat. 3.0° N

NASA/JPL/Malin Space Science Systems

En el barranco formado en el laboratorio (lado izquierdo), es evidente la secuencia de varios flujos que configuran el abanico de detritos. La cabecera es muy similar a la de los barrancos marcianos de la imagen adjunta.

Estos casos sustentan que la arena fluidizada por CO₂ puede ser un mecanismo viable para formar al menos algunos barrancos en los diversos ambientes geológicos a varias latitudes y altitudes.

De los resultados experimentales y de las analogías que detectamos al comparar los barrancos de laboratorio y los barrancos marcianos se sugiere que los procesos asociados a la formación de estos rasgos son superficiales. Una combinación de estos procesos pudieron tomar parte durante el tiempo y lugar de formación de los barrancos. El inicio de ellos podría variar pero las etapas

subsecuentes podrían ser las mismas, aquellas del material fluidizado del modelo propuesto en este trabajo.

Con base a nuestro análisis de las imágenes y experimentos, consideramos que los barrancos experimentan numerosas fases de formación debido a los flujos sobrepuestos que se crean en la zona del material depositado.

La hipótesis de la fluidización de material seco propuesta en este trabajo también está apoyada por un reciente descubrimiento de barrancos encontrados en el cráter Dawes de la Luna, que son similares a los barrancos marcianos en estructura y tamaño. Bart (2007) revisó imágenes de la Luna con alta resolución, tomadas por la nave *Lunar Orbiter* en 1967, antes de los alunizajes de la misión Apolo. De 29 imágenes con laderas escarpadas detectó 3 que mostraron los rasgos de cabecera, canal y abanico. Bart menciona que los barrancos pueden formarse en la Luna por mecanismos de deslizamientos de terreno seco.

Recientemente se detectó agua en forma de hielo y en una variedad de concentraciones y de ambientes geológicos la Luna, y se habla de 600 millones de toneladas métricas de agua distribuidas en 40 cráteres cerca del polo norte lunar según datos obtenidos por las misiones LCROSS, (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite de la NASA) en 2009, y el Topógrafo de Mineralogía Lunar (Moon Mineralogy Mapper, conocido como M3 o "M al cubo"), a bordo del orbitador hindú Chandrayaan-1, en 2008.

(Fuente: Spudis 2010 http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2010/18mar_moonwater/)

Este hecho sugiere un pasado "hídrico" de la Luna, sin embargo serán necesarias futuras investigaciones para esclarecer el origen y las condiciones en que el hielo de agua se ha depositado en la superficie lunar.

No obstante lo anterior, el satélite terrestre carece de las condiciones adecuadas para que haya habido algún líquido en su superficie, al menos en un pasado geológico reciente. Su atmósfera es casi inexistente y posee baja gravedad

Por lo tanto, la existencia de los barrancos demuestra que estos pueden

formarse en ambientes secos y por procesos relacionados a movimiento de materiales secos, también en otros planetas o satélites.

Un ejemplo reciente en el año 2011, la autora reconoció probables barrancos dentro de las laderas de un cráter de impacto del asteroide Vesta. Este hecho sustenta que estos rasgos pueden formarse en ambientes aparentemente secos y en cuerpos relativamente pequeños como asteroides o lunas de tamaño “reducido” en comparación a otras lunas de grandes dimensiones. Posteriormente en imágenes de alta resolución se comprobó la existencia de barrancos sobre la superficie de dicho asteroide.

En el caso de Marte proponemos que son necesarios estudios más profundos del CO₂ marciano, lo que ayudará a resolver completamente el enigma de los barrancos.

Capítulo 6.- Discusión

Desde el año 2000 en que se reportó la existencia de estos barrancos se ha tratado de explicar su origen con las teorías mencionadas en los capítulos 2 y 3.

Todas las teorías presentan puntos débiles todavía difíciles de resolver, por lo que posiblemente algunas de ellas estén perdiendo sustento. Particularmente las teorías que involucran agua líquida son las que están en este caso.

A continuación, se discuten las principales objeciones que encontramos en varias de estas teorías. Tomamos en consideración los resultados que obtuvimos de nuestros experimentos y análisis de imágenes para descartar algunas aseveraciones no claras de otras hipótesis y para mostrar que nuestro modelo de la fluidización gaseosa del CO₂ explica mejor los procesos de formación de barrancos.

De acuerdo con la teoría propuesta en esta tesis, los procesos involucrados en la formación de barrancos marcianos son exógenos. Se sabe que los barrancos están distribuidos en condiciones diferentes de altitud, latitud y geología de Marte. Esto limita ampliamente la existencia de procesos internos (subsuperficiales), ya que de existir tales procesos, sería necesario que se comportaran de manera similar bajo cualquiera de los parámetros citados. Por ejemplo, si un líquido fuera el modelador de estos rasgos, la misma dinámica se presentaría en cualquier terreno con barrancos.

6.1 Objeciones a las hipótesis propuestas previamente.

Esta investigación ha revelado que los modelos basados en el agua resultan un tanto controversiales, ya que la ubicación de los barrancos se presenta también en regiones de muy baja temperatura, de tal manera que el agua en estado líquido no pudo haber intervenido. Por ejemplo, los barrancos que se localizan en sitios con temperaturas de -70°C a -100°C (Carr, 2000).

La apariencia geológicamente joven de los barrancos se debe a la casi ausencia de pequeños cráteres de impacto sobrepuestos en los canales y en los conos de detritos y por la comparación de estos rasgos con el resto de la superficie marciana. Es difícil estimar la edad de estos rasgos. Están formados en terrenos de diferentes edades, pero ello no indica su edad definitiva. Posiblemente los más antiguos se hayan erosionado. Si su formación es progresiva será aún más difícil estimar su edad. Tal vez los primeros barrancos se formaron cuando Marte tuvo un ambiente cálido y húmedo y su atmósfera era más densa, al final del fuerte bombardeo planetario durante la era Amazoniana. Esos barrancos muy antiguos posiblemente se formaron por etapas durante diferentes ciclos de alta oblicuidad del planeta, sucedidos entre 10^5 a 10^6 años (Malin y Edgett, 2000, Lee *et al.*, 2002) con variaciones de 15° a $> 35^\circ$ cuando el hielo de agua derretido era transportado hacia los polos.

Si la mayoría de los barrancos se hubiera originado por un líquido proveniente del subsuelo (agua pura, agua salina o CO_2), su distribución indicaría la existencia de numerosos reservorios distribuidos en un rango muy amplio de elevaciones y en regiones extensas de la superficie marciana.

Esto genera varias interrogantes: ¿cuánta agua o algún otro líquido puede existir en la corteza marciana? , ¿cuál sería él o los procesos para recargar los acuíferos en etapas geológicas pasadas y actuales? ¿Cuál proceso generaría la expulsión del líquido desde los acuíferos o reservorios?

Ya que gran parte del agua podría evaporarse en o cerca de la superficie y otra parte se filtraría al subsuelo, entonces ¿se habrían formado miles de barrancos? ¿En dónde estarían situados los acuíferos y cómo alimentarían a los sistemas de barrancos localizados a ambos lados del borde de un cráter de impacto? Estas interrogantes aún no se resuelven. Aunque en algunas teorías se invoca a la existencia de acuíferos marcianos, no se han hecho cálculos de la profundidad a la que se encontrarían. Durand (2003) hizo un cálculo de la profundidad a la que existirían los acuíferos dadas las condiciones del planeta, y el resultado es mayor a los 2 km, de profundidad, lo cual hace bastante difícil considerar los procesos que provocarían la expulsión del agua líquida, pues no se ha detectado, por ejemplo, energía geotérmica y las etapas finales en que la hubo

se remontan a unos 10 millones de años (Hartmann, 2003). No obstante que 2 km de profundidad es una cifra geológicamente baja, sería suficiente para observar las huellas de una actividad erosiva intensa en barrancos formados por agua hace 10 millones de años. Sumado a esto, los barrancos serían numerosos en las áreas con actividad geotérmica “reciente” que corresponden a Amazonian Planitia y Elysium Planitia en el hemisferio norte. Pero la densidad de sistemas de barrancos sigue siendo mayor en latitudes medias del hemisferio sur.

Recientemente, The Planetary Society (2006), dio a conocer una imagen de un cráter de impacto en Terra Sirenum (36.6°S, 161.8°W) en la cual se observa sobre una ladera, una marca brillante que semeja el deslizamiento de algún material (Figura 6.1).



Figura 6.1. Cráter de impacto en Terra Sirenum (36.6°S, 161.8°W). Las dos imágenes muestran un cambio de tono sobre un barranco. se interpretó como evidencia de barrancos activos. Sin embargo no se ha dado una explicación definitiva del material que se deslizó sobre el terreno. Imagen tomada de The Planetary Society, (2006).

De inmediato, Malin y colaboradores (2006) sugirieron que era agua fluyendo y, por lo tanto, evidencia de la formación de barrancos. Esta clase de marcas también las encontraron en otras laderas en 20 cráteres recientes formados entre los años 1999 y 2006. Pero ello no es indicador de la existencia de agua líquida sobre las laderas durante la pasada década. Puede haber otras

explicaciones.

Las teorías que involucran agua líquida son difíciles de mantener y Edgett reconoce que los barrancos pueden haberse formado sin necesidad de un líquido (Comunicación personal, 2011).

La autora con el Dr. Ken Edgett, uno de los descubridores de los barrancos marcianos (Figura 6.2)



Figura 6.2. La autora con el Dr. Ken Edgett, uno de los descubridores de los barrancos marcianos

También se han encontrado marcas recientes de tono oscuro, cuyo origen se ha planteado como deslizamientos de material seco por actividad eólica y por avalanchas secas (Treiman y Louge, 2004; Treiman, 2008) o bien, debidas a la sublimación de la nieve de CO_2 que ha dejado al descubierto material de diferente textura y tono. En las figuras 6.3 y 6.4, se observan, primero, las líneas oscuras que se han interpretado como originadas por algún líquido, pero en otras imágenes con sitios similares en mejor resolución se ve que estos rasgos parecen más deslizamientos de material acumulado sobre la ladera. En la figura 6.3 la imagen Hirise, corresponde a un sitio de Valle Marineris (lat. $13^{\circ}90$ y long $300^{\circ}0$). Mangold y colaboradores (2008) interpretan que las líneas oscuras observadas en las paredes de las cabeceras de los barrancos pueden ser típicas de flujos

granulares y que las genera el descongelamiento de las capas de CO_2 acumuladas. Su longitud varía desde un metro a decenas de metros (figura 6.4). Estas líneas o marcas podrían corresponder a etapas tempranas en la formación de los barrancos. Esta interpretación de la asociación entre ambos rasgos es preliminar y deberá investigarse a profundidad. La observación de los cambios en la formas de estas líneas, por ejemplo durante una año marciano, podría dar indicios del origen de estos rasgos y su posible asociación a los barrancos.

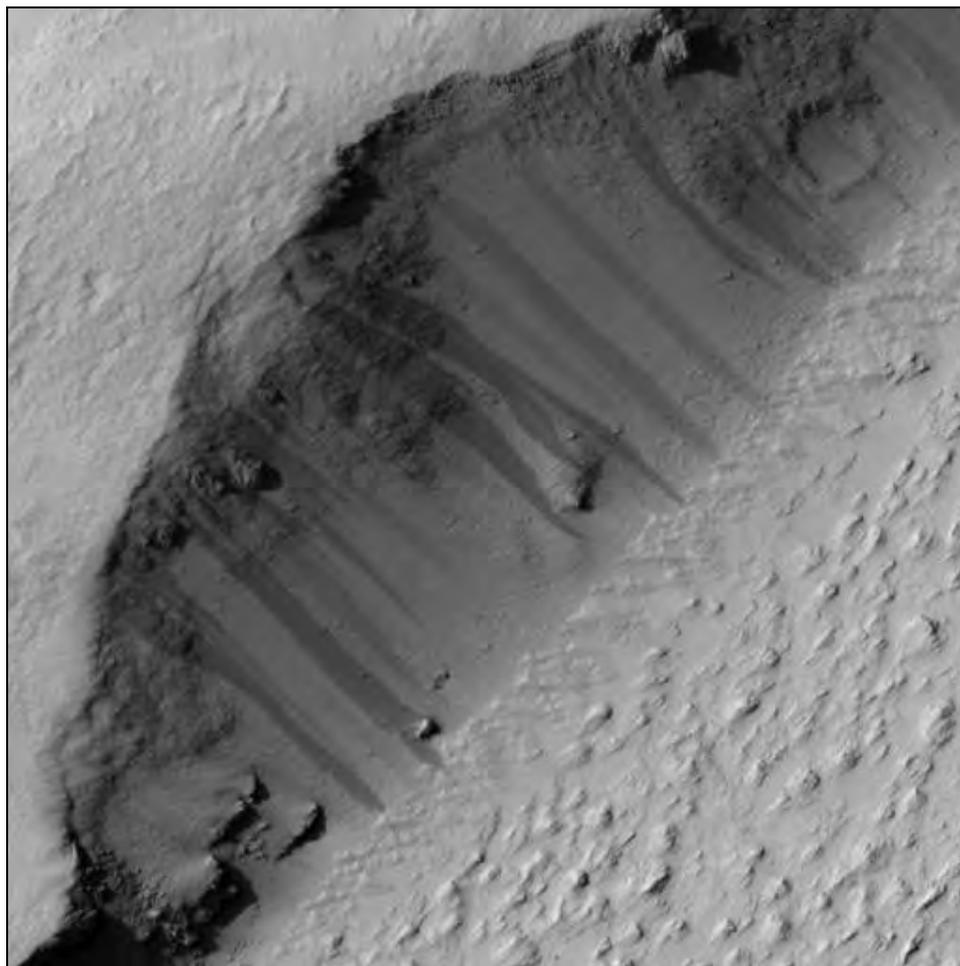


Figura 6.3. El origen de estas líneas o marcas sobre numerosas laderas marcianas se ha tratado de explicar que son resultado de flujos de material seco o por flujos de algún líquido. La longitud de estas marcas alcanza varios metros. Aún es incierto su origen. NASA/JPL/La Universidad de Arizona

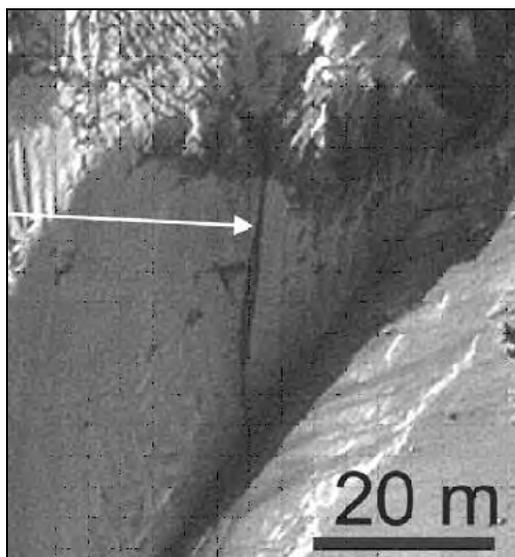


Figura 6.4. La longitud de estas marcas oscuras alcanza varios metros. Aún es incierto su origen. NASA/JPL/La Universidad de Arizona

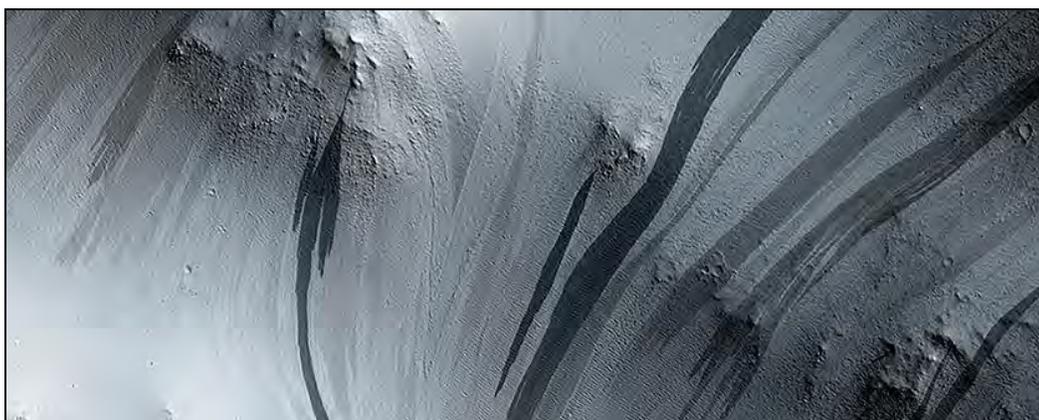


Figura 6.5. Líneas claras y oscuras en una ladera de Arabia Terra. Según investigadores de la Universidad de Arizona, las líneas de tonos claros al parecer no son muy comunes como las oscuras. En general las líneas tienen formas pequeñas, y una rugosidad interior que es menor que el ancho de la propia línea. Imagen ESP_022405_1910. NASA/JPL/La Universidad de Arizona.

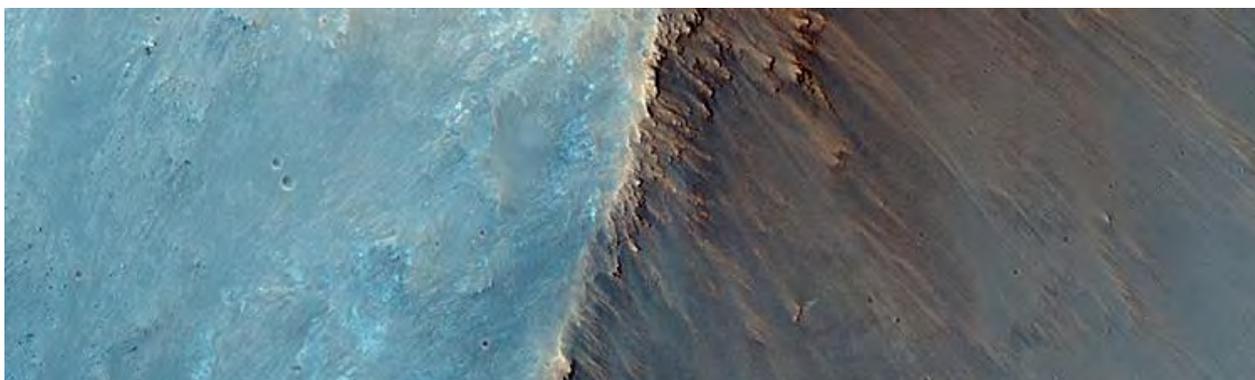


Figura 6.6 Movimiento de material seco y que puede corresponder a etapas tempranas de la formación de barrancos (lat -13.90°, long 300.0. oct 2007-Hirise). NASA/JPL/UNIVERSITY OF

En algunas teorías (Dickson *et al.*, 2007) se infiere que debido a la naturaleza sinuosa de algunos canales, existió una componente fluvial en la formación de los barrancos. Sin embargo, se observa que en los experimentos descritos en las secciones 5.2.1 y 5.2.2 con material seco, se formaron este tipo de canales sin necesidad de un fluido.

También se ha recurrido a explicar algunos de los barrancos mediante los flujos de detritos asociados a fuentes de hielo y nieve de agua cercanas a la superficie, las cuales saturan el material seco de las laderas, y los barrancos se forman por flujos múltiples (Lanza *et al.*, 2008).

En otros intentos, Dixon y colaboradores (2008) realizaron experimentos y formaron barrancos con arena de grano medio y flujos de agua inyectados desde el interior de la arena. Aunque no siempre se formaron las tres características típicas de la cabecera, el canal y el abanico de detritos. Sin embargo, ello no probaría que los barrancos marcianos muy recientes se originen por flujos de agua líquida bajo las condiciones ambientales actuales de Marte.

Por otro lado, que los barrancos se formen por CO₂ líquido, es también bastante improbable, ya que para que haya bióxido de carbono líquido se necesitan presiones atmosféricas más altas, incluso que las necesarias para el agua líquida.

En la propuesta del presente trabajo se sugiere la intervención del CO₂ pero en forma de nieve y, como proceso involucrado, la sublimación del mismo. Aunque se ha sugerido que en Marte la sublimación de CO₂ está limitada a latitudes medias y que en regiones muy cercanas a los polos el hielo ya no se sublima, debido a las temperaturas tan bajas, y que en latitudes bajas no llegan a producirse altas cantidades de hielo de CO₂ (lo cual no favorecería la formación de barrancos); consideramos que el aumento en la oblicuidad del planeta puede hacer que la zona ecuatorial experimente temperaturas más bajas.

También con base en las simulaciones hechas por Cedillo y coautores (2011) es posible que ocurra sublimación y fluidización estacional del CO₂ congelado durante la iniciación de barrancos marcianos polares (Ver anexo 2).

El modelo de flujos secos propuesto por Treiman (2003) se basa en que los barrancos pueden ser formados por avalanchas de material granular fino, como polvo o partículas de arena. Con base en observaciones del color y brillo de los mantos de material sobre las dunas marcianas y por la ausencia de grandes rocas, infirió que el material depositado proveniente de los barrancos es granular fino (polvo y limo) como en las avalanchas de nieve terrestres.

La formación de barrancos por avalanchas de arena llevada por el viento es más probable, pero se ha visto que la posición de los barrancos no coincide con los patrones de viento (Heldmann y Mellon, 2004). El modelo de Treiman (2003) funciona para barrancos formados sobre material de poca dureza y en laderas con ángulos cercanos al ángulo de reposo.

Un modelo similar al de Treiman (2003) es el propuesto por Shinbrot y coautores (2004), con flujos de material seco fluidizados como creadores de los barrancos. En este escenario, el inicio del desplazamiento de material sería producido por un colapso abrupto o por el viento. Este modelo, como ellos mismos señalan, funcionaría para explicar algunos de los barrancos marcianos. Aunque sus estudios aún son limitados, explican que se enfocaron a probar que estos rasgos, atribuidos a líquidos, pueden generarse por material granular seco.

No es posible conocer qué tipo de material es transportado por los barrancos debido a la baja resolución de las imágenes disponibles y a la falta de información espectral. A pesar de estas limitaciones, se ha inferido que el material consiste principalmente de detritos rocosos. En las regiones de las cabeceras se han observado diferentes fragmentos rocosos cuyo tamaño, se infiere, varía en metros, no así en la zona de depósito.

Además, los ángulos de las laderas (en donde se acumula el material acarreado por los vientos), deberían ser mayores al ángulo de reposo ($\sim 35^\circ$), pero en Marte muchas laderas con barrancos tienen ángulos menores (Heldman y Mellon, 2004).

6.2.- Puntos favorables a la Teoría de fluidización del CO₂ gaseoso.

El modelo propuesto en esta tesis explica mejor la formación de barrancos a diferentes latitudes y en diferentes terrenos y orientaciones, ya que los procesos de formación son externos y adecuados a las condiciones actuales del planeta. En el caso de los barrancos de latitudes ecuatoriales, insistimos en que éstos pueden generarse cuando cambia la oblicuidad del planeta. Quizá los barrancos existentes en esas latitudes, por ejemplo los de Valle Marineris, se hayan formado durante etapas de oblicuidad alta o bien, inferimos que estas zonas ecuatoriales son lo suficientemente frías como para que se acumulen capas de hielo carbónico durante la noche y se formen los barrancos mediante los procesos citados en el modelo. Pero también puede ser importante la altitud, ya que si se considera que las temperaturas disminuyen a mayor altitud, aun en zonas ecuatoriales, las condiciones serían favorables para el proceso de fluidización y, por lo tanto, para la formación de barrancos. En vastas áreas de Valle Marineris existen deslizamientos de terreno en las laderas que se han interpretado como rasgos formados por agua líquida (Lucchitta, 1987; Harrison y Grima, 2003), o por avalanchas rocosas secas (McEwen, 1989), pero tras el análisis de imágenes de alta resolución se considera que más bien se deben al movimiento de material seco y que, en algunos casos, podrían corresponder a las etapas tempranas en la formación de barrancos (figura 6.6). (lat -13.90°, long 300.0. oct 2007-Hirise).

La existencia de barrancos sin intervención de un líquido es posible, ya que recientemente se reportó el descubrimiento de barrancos en la Luna (Bart, 2007), donde es evidente la inexistencia de algún líquido en su superficie, debido a las condiciones extremas del satélite (figura. 6.7).

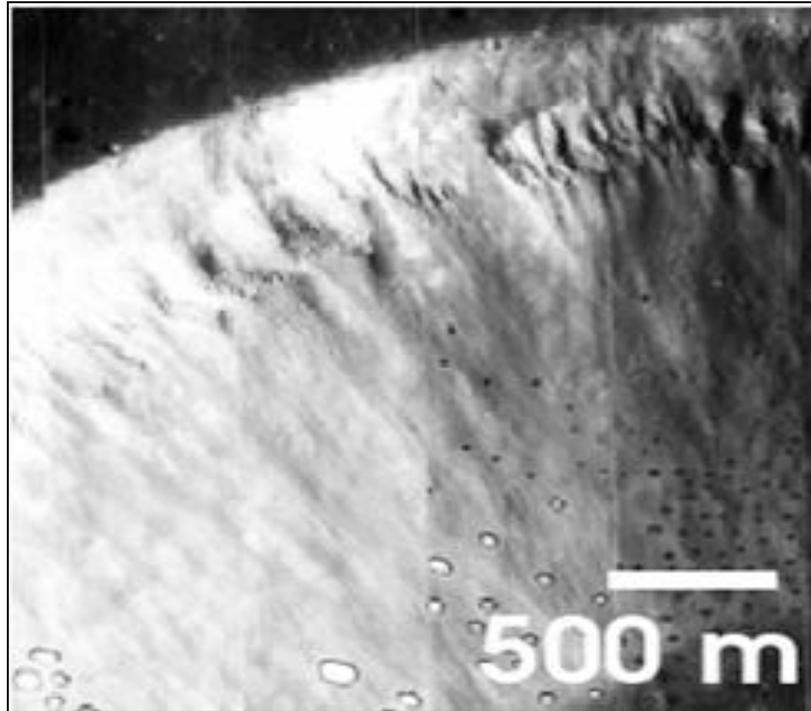


Figura 6.7. Barrancos en una ladera de un cráter de impacto en La Luna. Este hecho confirma que los barrancos pueden formarse en otros cuerpos planetarios por procesos secos, sin intervención de algún líquido. En el caso de Marte por fluidización del material.

Por otro lado, la autora considera que la formación de los barrancos no está relacionada con su orientación, ya que es diversa en muchos de ellos que se han observado.

Con base en los resultados experimentales y observaciones de esta investigación, la autora propone que la formación de al menos algunos barrancos puede ser análoga a los flujos piroclásticos pero fríos. Sobre Marte tales flujos pueden resultar de la acumulación de hielo de CO_2 y polvo sobre las laderas durante el invierno. El incremento de temperatura durante la primavera puede causar que el hielo de CO_2 se sublime iniciando el debilitamiento de las laderas y el proceso gravitacional (Cedillo *et al.*, 2008).

Debido a que numerosos barrancos regularmente presentan diferentes orientaciones, no se considera que el proceso dependa únicamente de ese factor. Por otra parte, es posible que existan casos en que la oblicuidad del planeta haya favorecido la formación de barrancos.

La autora encontró rasgos tipo barrancos en la región ecuatorial que ya habían sido reportados como abarrancamientos desde hace casi una década.

En nuevas hipótesis se está proponiendo la intervención de flujos secos como formadores de los barrancos y en algunas otras hipótesis las conclusiones son similares a las que se reportan en el modelo de la autora. Por ejemplo, Dickson y colaboradores (2007) reportan que la mayoría de las agrupaciones de barrancos ocurre en inclinaciones promedio de 26.5° y no encontraron correlación entre la inclinación y la altitud u orientación. Este valor es semejante al que se obtuvo con los experimentos en el presente trabajo, en los que se formaron barrancos en ángulos entre 10° y 35° . Dichos autores encontraron una completa ausencia de barrancos en la región ecuatorial. Sin embargo, en la revisión de imágenes Themis se han localizado sitios en el Ecuador con barrancos, aunque su número es muy reducido.

En otra propuesta, Howard y coautores (2008) señalan que la formación de las partes que conforman los barrancos requiere de docenas o quizás cientos de eventos de flujos (no líquidos), lo cual coincide con la propuesta de la autora, citada en el capítulo 5. También citan que los vertederos o canales se formaron por flujos de corta duración y magnitud apreciable (como los flujos de detritos).

CONCLUSIONES

Conclusiones generales

Hasta ahora, de las hipótesis que se han citado en este trabajo y que tratan de encontrar el origen de los barrancos marcianos, ninguna explica completamente su origen ni los procesos asociados a su desarrollo; en parte, esto queda parcialmente justificado por las limitaciones de resolución de algunas imágenes, por la disponibilidad de datos enviados desde las naves de exploración por la complejidad de la morfología y la actividad reciente de algunos barrancos. Sin embargo, esta situación da la pauta para proponer nuevos modelos e ir discriminando los que no sean capaces de explicar la diversidad de barranco.

Puede decirse que todas las teorías plantean un panorama general de la formación de los barrancos marcianos a partir de la cual pueden aceptarse, descartarse o involucrarse parámetros que permitan avanzar en la comprensión de estos rasgos.

Es necesario continuar elaborando teorías o modificando las existentes con base a la nueva información que se reciba de las misiones espaciales destinadas al planeta Marte. Actualmente llegan numerosas imágenes que cada vez aportan información más detallada.

Tan sólo hasta noviembre de 2007 se habían obtenido 4200 imágenes HiRISE, de las cuales casi 600 imágenes contenían sitios con barrancos y actualmente llegan a sumar unas 1000 imágenes. Su análisis permitió descubrir una mayor diversidad morfológica de estos rasgos. La longitud de éstos se había reportado en decenas o cientos de metros, pero en las nuevas imágenes se observó que puede llegar a ser de varios kilómetros (Gullick, 2008).

En muchos casos las naves fotografían las mismas regiones con barrancos de imágenes más antiguas para ver posibles cambios. En algunas laderas se ha detectado actividad actual (movimiento de material), en regiones con acumulación de escarcha o hielo de CO₂ que puede estar relacionada con la formación de los barrancos.

Investigaciones futuras permitirán no solo aclarar la formación de estos

barrancos sino de otros rasgos y procesos geomorfológicos de este enigmático planeta.

Conclusiones específicas

- En el pasado lejano, cuando la presión atmosférica y la temperatura eran suficientemente altas para permitir agua líquida en la superficie del planeta, la formación de barrancos por este líquido fue factible.
- La apariencia joven de los barrancos y la evidencia de su actividad reciente, mostrada en imágenes obtenidas por las naves de reconocimiento, deberá explicarse con procesos sin intervención de agua o CO₂ líquidos.
- Nuestro modelo propone que la acumulación de nieve de CO₂ y polvo sobre las laderas sucede en el invierno marciano y durante la primavera el aumento de temperatura hace posible la sublimación de la nieve, originando que la mezcla de CO₂ y polvo se fluidice y se desplace ladera abajo por gravedad formando los barrancos en varias etapas o durante los cambios de oblicuidad del planeta.
- Los experimentos realizados nos permitieron confirmar que material granular seco (arena) se comporta como un fluido. Asimismo el hielo de CO₂ mezclado con material granular secos al sublimarse experimenta un desplazamiento del material hacia la base de la ladera.
- Con el fin de conocer los procesos que pudieron o pueden intervenir en el origen y desarrollo de los barrancos marcianos y hacer un estudio comparativo con barrancos terrestres, se seleccionó la cumbre del volcán Nevado de Toluca por tener un clima frío por sus características volcánicas y morfología periglacial, pues en Marte numerosas áreas con barrancos exhiben una morfología similar. El trabajo de campo constituyó un gran refuerzo en la comparación del relieve tipo barranco.
- Cabe señalar que numerosos barrancos marcianos tienen variantes en su estructura que también se explican con nuestro modelo (Cedillo y Durand, 2010). Localizamos varios barrancos con diferentes orientaciones en Marte, lo cual debilita el argumento de que la orientación jugó un papel en su formación, como se propone en otros modelos

- Las analogías entre los barrancos marcianos y los resultados de nuestros experimentos son consistentes la morfología de numerosos barrancos marcianos como canales angostos y sinuosos, cabeceras, y abanicos de detritos, evidenciando que diferentes procesos modelan relieve similar en diferentes superficies planetarias. Las longitudes de los barrancos marcianos que medimos sobre imágenes y cuyo rango es de 24 metros a 1775 metros valores son análogos a barrancos terrestres.
- Los barrancos existentes en latitudes cercanas a los polos marcianos refuerzan la hipótesis de fluidización gaseosa de CO₂ secos propuesta por Cedillo y coautores (20011).
- De nuestros resultados se infiere que estos rasgos pueden formarse por procesos diferentes y sin intervención de líquido, en Marte.
- Recientemente La ocurrencia de barrancos se ha verificado en las superficies de la Luna y del asteroide Vesta. En estos casos los procesos que los formaron posiblemente se dieron sin intervención de algún líquido. En principio, debido a sus características generales e historia geológica.
- Debido a la diversidad de los barrancos en forma, localización y probablemente edad, se concluye que pueden haberse formado por una combinación de procesos.
- Rasgos geomórficos similares pueden formarse por mecanismos diferentes, por ejemplo, los barrancos se forman por flujos de agua en la Tierra, pero los resultados de los experimentos sugieren que la fluidización de polvo puede ser un mecanismo en Marte. El inicio de barrancos marcianos, podría variar pero las etapas subsecuentes podrían ser las mismas, aquellas del material fluidizado del modelo propuesto en este trabajo.
- Posteriormente, la autora pretende complementar el modelo propuesto incluyendo más parámetros, tales como profundidad y ancho de los barrancos marcianos y establecer una clasificación basada en el mayor número de parámetros posibles y para diferentes regiones del planeta.

Referencias

Referencias electrónicas. Internet:

- 1) *Diccionario Oxford-Complutense. Ciencias de la Tierra. 1ª reimpresión española enero 2004.*
<http://books.google.com.mx/books?id=1XKXQqUGDnoC&pg=PA48&lpg=PA48&dq=areologia+dios++griego&source=bl&ots=dI3k08IZ33&sig=YO66fpYa3S4VJW-EkyslzAp2JA8&hl=es&sa=X&ei=PP4qUMDyloO29QSQ94CgBA&ved=0CEIQ6AEwAA#v=onepage&q&f=false> (Accesado agosto 2012.)
- 2) *Geografía de Marte. Nomenclatura moderna.*
http://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa_de_Marte#Nomenclatura_moderna (Accesado agosto 2012.)
- 3) Diccionario de Astronomía. *Selenografía.* <http://www.astromia.com/glosario/selenografia.htm> (Accesado agosto 2012.)
- 4) *Free Online Dictionary. Selenografía.*
<http://www.babylon.com/definition/Selenograf%C3%ADa/Spanish> (Accesado agosto 2012.)
- 5) <http://www.geography.org.uk/events/annualconference/derby2005/> Morland N. 2005. Teacher-to-Teacher: Extra-Terrestrial Geography (KS3-4) The Geographical Association Annual Conference - University of Derby 31 March-1 April 2005. The Geographical Association website www.geography.org.uk www.geographyteachingtoday.org.uk
- 6) Mars Datum
<http://www.lpi.usra.edu/education/K12/gangis/marsdatum.html> (Accesado mayo 2013.)
- 7)- Ciencia@Nasa 2000.
<http://www.astroseti.org/web/cnasa>
<http://www.ciencia.nasa.gov/headlines/y2003/19feb%5Fsnow.html>
- 8) VIEW OF THE SOLAR SYSTEM. *Mars Introduction.*
<http://www.solarviews.com/eng/mars.htm> (Accesado 2008)
- 9) http://www.resa.net/nasa/mars_life_planetary.html
- 10) <http://www.elatshaw.bol.ucla.edu/eriksterraforming2.html>
The Relationship Between Planetary Atmospheres and Life On Mars by Erik Latshaw
- 11) <http://www.7nationalacademies.org/ssb/marsach09.pdf>
- 12) <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/M/Marspast.html>) Mars, past conditions. The Encyclopedia of astrobiology, astronomy and spaceflight
- 13) <http://www.efn.unc.edu.ar/departamentos/geoapl/fotogeol/marte.htm>
Francisco Quintana Salvat. Unidad académica Cátedra de Fotogeología y Teledetección (Laboratorio de Fotogeología). Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba

14) <http://www.lpi.usra.edu/publications/slidesets/marslife/>

Compiled by Pat Dasch and Allan Treiman

(Fuente: http://www.lpi.usra.edu/science/treiman/greatdesert/workshop/marsmaps2/marsmaps2_img/mola_color1.jpg)

(Fuente: <http://geneura.ugr.es/~jmerelo/atalaya/print.cgi?id=/historias/39286&nombre=javarm>)

Fuente: http://palaeos.com/precambrian/martian_timescale.html

(Fuente: <http://astronomy.swin.edu.au/sao/guest/hoffman/>).

(Fuente: http://www.lpi.usra.edu/science/treiman/greatdesert/workshop/marsmaps2/marsmaps2_img/mola_color1.jpg)

CREDITOS DE LAS IMAGENES MOC
NASA/JPL/Malin Space Science Systems."
"NASA/JPL/MSSS,".

CREDITOS DE LAS IMAGENES HiRise
NASA/JPL/UNIVERSITY OF ARIZONA

Créditos imágenes Themis (Thermal Emission Imaging System)
Christensen, P.R., N.S. Gorelick, G.L. Mehall, and K.C. Murray, *THEMIS Public Data Releases*,
Planetary Data System node, Arizona State University, <<http://themis-data.asu.edu>>.

Arce S. J.L. (2003). **Condiciones Pre-eruptivas y evolución de la erupción pliniana pómez Toluca superior, volcán Nevado de Toluca**. Tesis de Doctorado. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. 135 pp.

Arce J.L., Macías J.L. y Vázquez-Selem L. (2003). **The 10.5 ka plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, México Stratigraphy and hazard implications**. GSA Bulletin. V. 115; no. 2; p. 230-248.

Aceves-Quesada F., López-Blanco J. y Martín del Pozzo A. L. (2006). **Determinación de peligros volcánicos aplicando técnicas de evaluación multicriterio y SIG en el área del Nevado de Toluca, centro de México**. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. V. 23 num. 2 p. 113-124.

Arfstrom J. y Hartmann W. K. (2005). **Martian flow features, moraine-like ridges, and gullies: Terrestrial analogs and interrelationships**. Icarus 174, Pages 321-335.

Baker V.R. (2003). **Icy martian mysteries**. Nature. Vol 426/18. pp 779-780.

Baker V.R. (1993). **Extraterrestrial geomorphology: science and philosophy of Earthlike planetary landscapes**. Geomorphology, 7 9-35 9 Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

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.

Baker, V:R. (1984) **Planetary geomorphology**. Journal of Geological Education. Volume 32, Issue 4, pages 236-246. Dept. of Geosciences, Univ. of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA.

Baker, V. R. y Milton, D. J. (1974). **Erosion by catastrophic floods on Mars and Earth**. Icarus 23, 27–41.

Bart W. D. (2006). **Comparison of Martian gullies and lunar crater wall landslides**. Lunar and Planetary Science XXXVII.

Berman D.C., Hartmann W.K., Crown D.A. y Baker V.R. (2005). **The role of arcuate ridges and gullies in the degradation of craters in the Newton Basin region of Mars**. *Icarus* 178. Pages 465-486.

Bibring J.P., Langevin, Y., Mustard J.F., Poulet, F., Arvidson, R., Gendrin, A., Gondet, B., Mangold, N., Pinet, P., F. Forget, F., the OMEGA team):
<http://geneura.ugr.es/~jmerelo/atalaya/print.cgi?id=/historias/39286&nombre=javarm>

Cabrol N.A. y Grin E.A. (2001) **Composition of the drainage network on early Mars**. *Geomorphology*. 37. 269-287.

Carr M., y Head J.W. (2010). **Geologic history of Mars**. *Earth Planet Sci Lett*. 294;185-203.

Carr M. (2000) *Ciencia @NASA*.
<http://ciencia.astroseti.org/nasa/articulo.php?num=645>

Cedillo F.Y., Treiman A.H., Lasue J. y Clifford S.M. (2011). **CO₂ gas fluidization in the initiation and formation of Martian polar gullies**. *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L21202, doi:10.1029/2011GL049403,2011.

Cedillo-Flores, Y. Durand-Manterola H.J. (2010). **Martian gullies: Produced by fluidization of dry material**. arXiv:1004.5417 [pdf].

Cedillo F. Y., Durand-Manterola H. J. y Craddock R. A. (2008) **Martian gullies created by fluidization of dry material**. Workshop on Martian Gullies: Theories and Tests. 8019.

Christensen R. P. (2003). **Formation of recent martian gullies through melting of extensive water –rich snow deposits**. *Nature*. Vol 422. P.45-47.

Clifford S. (1992). **Water on Mars: Inventory, Distribution, and Possible Sources of Polar Ice**. Workshop on the Polar Regions of Mars: Geology, Glaciology, and Climate History (NASA-CR-198021) WORKSHOP ON THE N95-70984 PART 2 (Lunar and Planetary Inst.). 13 p. Z9/91 0045525. MSATT. LPI Technical Report Number 92-08, Part 2

Clifford S.M, Fisher, D.A., Rice J.W.(2000) **Introduction to the Mars Polar Science Special Issue: Exploration Platforms, Technologies, and Potential Future Missions** GUEST EDITORIAL
Icarus 144, 205–209
doi:10.1006/icar.1999.6311, available online at <http://www.idealibrary.com> on

Clifford S. M., Lasue J., Heggy E., Boisson J., McGovern P. y Max M. D. (2010) **Depth of the Martian cryosphere: Revised estimates and implications for the existence and detection of subpermafrost groundwater**. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991–2012). Volume 115, Issue E7, July 2010. DOI: 10.1029/2009JE003462

Cosgrove Denis (2000). **Extra-Terrestrial Geography: Cosmography Before and After Von Humboldt**. Paper 2000. The Alexander Von Humboldt Lectures. University of California, Los Angeles Department of Geography, UCLA

Costard F., Forget N., Manglod N y J. P. Peulvast (2002). **Formation of recent Martian debris flow by melting of near-surface ground ice at high obliquity**, *Science*, 295, 110-113.

Craddock R.A y Howard A. D. (2002) **The case for rainfall on a warm, wet early Mars**. *Journal of Geophysical Research (Planets)*. Volume 107, Issue E11, pp. 21-1.

- De Prada P. F. y Martínez J.A. **La nieve carbónica como recurso didáctico**. Anales de la Real Sociedad Española de Química. Segunda época Enero-Marzo 2002.
- Dickson J.L., Head J. W. y Kreslavsky (2007). **Martian gullies in the southern mid-latitudes of Mars: Evidence for climate-controlled formation of young fluvial features based upon local and global topography**. *Icarus* 188 .315–323.
- Dickson J.L. y Head J.W. (2005). **Detection of gullies on central peaks and crater rims on Mars: implications for the origin of the gullies**. *Lunar and Planetary Science XXXVI*. 1097.
- Diniega S., Hansen, C.J., McElwaine J.N., Hugenholtz C.H., Dundas C.M. McEwen A.S. (2013). **A new dry hypothesis for the formation of martian linear gullies**. *Icarus*, Vol. 225, Núm. 1, Pag. 526–537
- Diniega, S., S. Byrne, N.T. Bridges, C.M. Dundas, A.S. McEwen (2010) **Seasonality of present-day Martian dune-gully activity**. *Geology* 38, 1047-1050. doi: 10.1130/G31287.1
- Dixon J., Coleman K.A., Howe K.L, Roe L.A., y Chevrier V. (2008). **Simulation experiments of Mars' gullies**. Workshop on Martian Gullies: Theories and Tests. #8029. Houston Texas.
- Doran P.T. y Forman S. L. (2000). **Ideas about the surface runoff features on Mars**. *Science*. Vol. 290, 711-714.
- Draper D. S., Jones J.H. y Longhi J. (2000). **Martian weeping layers and the nature of volatile reservoirs in the upper Martian crust**. EOS TRANS. AGU 81 (48). Fall Meeting Supplm Abst P61B-04.
- Dundas C.M., McEwan A.S., Diniega S. Byrne S., and Martinez-Alonso S. (2010) **New and recent gully activity on Mars as seen by HiRISE**. *Geophysical Research Letters* 37, L07202, doi:10.1029/2009GL041351.
- Durand-Manterola H.J. (2003). **Degassing of volatiles in the geological history of Mars**. *Geofísica Internacional*, Vol. 42, Num. 1, pp.157-162
- Edgett K.S., Malin M.C., Williams R.M.E., y Davis S.D. (2003). **Polar- and middle- latitude martian gullies: a view from MGS MOC after 2 Mars years in the mapping orbit**. *Lunar and Planetary Science Conference XXXIV*, abstract 1038.
- Fairén G.A., Dohm M.J., Baker R. V., De Pablo A. M., Ruiz J., Ferris C.J. y Anderson C. R. (2003). **Episodic flood inundations of the northern plains of Mars**. *Icarus*. Vol. 165-1. P. 53-67.
- Frey E. L., Sakimoto S.E.H. y Frey H.V. (2004). **A preliminary relationship between the depth of Martian gullies and the abundance of hydrogen on near surface Mars**. *Lunar and Planetary Science XXXV*. 1977.
- Gaidos, E. J. (2001). **Criovolcanism and the recent flow of liquid water on Mars**, *Icarus*, 153, 218-313.
- García-Palomo A., Macías J.L., Arce J.L., Capra L., Garduño V.H., y Espíndola J.M. (2002). **Geology of Nevado de Toluca Volcano and surrounding areas, central Mexico**. Geological Society of America Map and Chart Series MCH089
- Gilmore M.S. y Phillips E.L. (2002) (a). **Geologic control of gully depths in three regions of Mars**. *Lunar and Planetary Science XXXIII*. 1295.
- Gilmore M.S. y Phillips E.L. (2002) (b) **Martian aquicludes required for gully formation** American Geophysical Union, Fall Meeting, abstract # P72C-09.

Gulick V. C. (2001) **Origin of the valley networks on Mars: a hydrological perspective.** *Geomorphology*. Volume 37, Issues 3-4 , April 2001, Pages 241-268.

Gulick V.C. (2008) **Morphologic diversity of gully systems on Mars: New insights into their formation from HIRISE.** Workshop on Martian Gullies: Theories and Tests. 8041.

Hansen, C. J., M. Bourke, N. T. Bridges, S. Byrne S, C. Colon, S. Diniega, C. Dundas, K. Herkenhoff, A. McEwen, M. Mellon, G. Portyankina, and N. Thomas (2011), **Seasonal erosion and restoration of Mars' northern polar dunes**, *Science* 331, 575; doi: 10.1126/science.1197636.

Hargitai, H. (2002) Planetary Landscape **Geography**. EGS XXVII General Assembly, Nice, 21-26 April 2002, abstract #1019 Eotvos Lorand University of Sciences, Dept. of Physical Geography, Budapest. Email: hargitai@emc.elte. EGU

Harrison K.P y Grimm R. E. (2003). **Rheological constraints on martian landslides.** *Icarus* vol. 163-Issue 2 P. 347-362.

Hartmann K. W. (2003). **A traveler's guide to Mars.** Cap 33 Promethei Terra. Workman Publishing. 468 pp.

Hartmann K. W, Thorsteinsson T. y Sigurdsson F. (2003). **Martian hillside gullies and Icelandic analogs.** *Icarus* 162. P. 259-277.

Hartmann K. W. Y Neukum G. (2001). **Cratering chronology and the evolution of Mars.** *Space Science Reviews*, v. 96, Issue 1/4, p. 165-194.

Head J. W., Marchant D. R., Dickson J. L., Levy J. S. y Morgan G. A. (2007). **Mars gully analogs in the Antarctic Dry Valleys: geological setting and processes.** *Lunar and Planetary Science XXXVIII* 1617.

Head J. W., Wilson L., Dickson J., Neukum G., and the HRSC Team. (2005). **"The Huygens-Hellas Giant Dike System on Mars: Implications for Late Noachian-Early Hesperian Volcanic Resurfacing and Climatic Evolution"**
Geology Ms#G22163A

Heldmann J.L. y Mellon M.T. (2004). **Observations of martian gullies and constraints on potential formation mechanisms.** *Icarus* 168, 285-304.

Heldmann J.L., Carlsson E, Johansson H., Mellon M.T. y Toon O. B. (2007). **Observations of martian gullies and constraints on potential formation mechanisms. Part II The northern hemisphere.** *Icarus* (2007) Article in Press.

Heldmann J.L., Toon O.B., Pollard W.H., Mellon M.T., Pitlick J., McKay C.P. y Andersen D.T. (2005 a). **Formation of Martian gullies by the action of liquid water flowing under current martian environmental conditions.** *Lunar and Planetary Science XXXVI*.

Heldmann J.L, Johansson H., Carlsson E. y Mellon M. T. (2005b). **Northern hemisphere gullies on Mars.** *Lunar and Planetary Science XXXVI* 1271 PDF.

Hoffman N. (2000). **White Mars: A New Model for Mars' Surface and Atmosphere Based on CO₂.** *Icarus* 146, 326–342. doi:10.1006/icar.2000.6398

Hoffman N (2001) a. **Carbon Dioxide on Mars**
<http://astronomy.swin.edu.au/sao/guest/hoffman/>

Hoffman N. (2001) b. **Fresh polar channels on Mars as evidence of continuing CO₂ vapor supported density flows.** Lunar and Planetary Science XXXII. 1271.

Hoffman N. (2003). **Gullies seen to form Mars.** BBC news Science.
[//news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/801086.stm](http://news.bbc.co.uk/1/hi/sci/tech/801086.stm)

Howard A. D., Moore J. M., Dietrich W. E. y Perron T. (2008) **Martian gullies: source materials, flow properties, and terrestrial analogs.** Workshop on Martian Gullies: Theories and Tests. 8025.

Hughenoltz, (2008). **Frosted granular flow: A new hypothesis for mass wasting in martian gullies.** Icarus 197 (2008) 65–72.

Irwin III R. P., Craddock R. A. y Howard A. D. (2005). **Interior Channels in Martian valley networks: Discharge and runoff production.** Geology; v. 33; no. 6; p. 489-492.

Ishii T., y Sasaki S. (2004). **Formation of recent Martian Gullies by avalanches of CO₂ frost.** Lunar and Planetary Science XXXV. #1556.

Izidoro A., de Souza K, Torres, O. C. Winter, Haghhighipour N. (2013). **A Compound model for the origin of Earth's water.** last revised 26 Feb 2013. <http://arxiv.org/abs/1302.1233>.

Jakosky, B. M., y M. H. Carr (1985), **Possible precipitation of ice at low latitudes of Mars during periods of high obliquity.** Nature, 315, 559–561.

Kargel S. J. (2004). **Mars: a warmer wetter planet.** Cap. 7 Neoglacial. *Editorial F.* Springer and Praxis Publishing. Pp 555.

Kennet H. W y Christiansen H.E. (1995) **Exploring the planets.** Cap 5. Macmillan Publishing Company.

Knauth P. L., Klonowski S. y Bart D. (2000). **Ideas about the surface runoff features on Mars.** Science, 290, 711-714.

Knauth P. I., y Burt D.M. (2002). **Eutetic brines on Mars: origin and possible relation to Young seepage features.** Icarus 158; 267-271.

Kochel R. C. y Trop J. M. (2007) **Icy debris fans and flows in Alaska: Earth analog for recent Mars flows.** Lunar and Planetary Science XXXVIII (1813).

Lanza N.L. y Gilmore M.S. (2006). **Depths, orientation and slopes of Martian gullies in the northern hemisphere.** Lunar and Planetary Science XXXVI. 2412.

Lanza N.L., Meyer G., Newsom H., Wiens R., y Okubo C. (2008). **Testing a debris flor source area and initiation hypotesis for simple “classic” Martian Gullies.** Workshop on Martian Gullies: Theories and Tests. 8038.

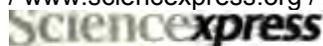
Lee P., McKay P.C. y Matthews J. (2002) **Gullies on Mars: clues to their formation timescale from possible analog from Devon Island, Nunavut, Artic, Canada.** Lunar and Planetary Science XXXVIII 2050.

Levrard B. y Laskar J. (2004). **Recent ice-rich deposits formed at high latitudes on Mars by sublimation of unstable equatorial ice during low obliquity.** Nature .Vol. 431.

- Lucchitta B.K. (1987). **Valles Marineris, Mars: Wet debris flows and ground ice**. Icarus Volume 72, Issue 2, November 1987, Pages 411-429.
- Lucchitta B.K., McEwen A.S., Clow G.D., Geissler P.E., Singer R.B., Schultz R.A. y Squyres S.W.(1992). **The Canyon System on Mars**. Chapter 14 p.453-492. MARS. The University of Arizona Press.
- Lunine J. I. (2006). **Origin of Water Ice in the Solar System**. Lunar and Planetary Laboratory pages 309-319. Meteorites And the Early Solar System II, Volume 2 edited by D. S. Lauretta, H. Y. McSween, Jr. Part IV: The first nebular epoch: genesis of the first Solar System materials. The University of Arizona Press in collaboration with Lunar and Planetary Institute
- Malin, M.C. y Edgett, K.S., (2000). **Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars**. Science, Vol. 288, 5475. P. 2330-2335.
- Malin, M.C., Caplinger, M.A. and Davis, S.D., (2001). **Observational evidence for an active surface reservoir of solid carbon dioxide on Mars**. Science 294, pp.
- Malin, M.C. and Edgett, K.S., (2001). **Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera: interplanetary cruise through primary mission**. Journal of Geophysical Research 106 E10, pp. 23429.
- Malin, M.C. and Edgett, K.S., (2003). **Evidence for persistent flow and aqueous sedimentation on early Mars**. Science 302; 1931-1934.
- Malin M. C., Edgett, K. S., Posiolova, L. V., McColley S. M., Eldar Z. Noe Dobrea. (2006). **Present-Day Impact Cratering Rate and Contemporary Gully Activity on Mars**. Science 314, 1573; DOI: 10.1126/science.1135156.
- Mangold N, Baratoux D, Costard F y Forget F. (2008). **Current gullies activity: dry avalanches observed over seasonal frost as seen on HIRISE images** . Workshop on Martian Gullies: Theories and Tests. 8005.
- Masursky H.; Boyce J.M.; Dial A.L.; Schaber, G.G.; y Strobell, M. E. (1977). **Classification and time of formation of Martian channels based on Viking data**. Journal of Geophysical Research, vol. 82, Sept. 30, 1977, p. 4016-4038.
- Mellon M.T. y Phillips J. R. (2001). **Recent gullies on Mars and the source of liquid water**. Journal of Geophysical Research, Vol. 106, No. E10. P 23165-23179. P 1-15.
- Missions to Mars. Exploring Mars-1. NASA's Mars Exploration Program. Lunar and Planetary Institute. http://science.hq.nasa.gov/missions/solar_system.html (Accesado 2011)
- Musselwhite, D. S., Swindle, T. D., and Lunine, J. I. (2001) **Liquid CO2 breakout and the formation of recent small gullies on Mars**. *Geophysical Research Letters*, v. 28(7), p. 1283-1285.
- McEwen, A.S. (1989). **Mobility of large rock avalanches: evidence from Valles Marineris, Mars**. Geology. Volume 17, Issue 12, Pages 1111-1114.
- Parker J. T. y Currey R. D. (2001). **Extraterrestrial coastal geomorphology**. Geomorphology vol. 37. P- 303-328.
- Peckyno R. (2006). **Fall All Possible Heavens: The History and Prospects of Extraterrestrial Geography** GEO 515
<http://oregonstate.edu/~peckynor/research/etgeo1.pdf>

Perron J. T, Dietrich E. W., Howard D.A., McKean A. J. (2003). **Ice-driven creep on Martian debris slopes**. Geophysical Research Letters. Vol. 30, No. 14, 1747.

Phillips, R. J¹,* Davis J.B.,^{2†}, Tanaka K. L.³, Byrne S.⁴, Mellon M. T.⁵, Putzig N. E.^{2,}, Haberle R. M. ⁶, Kahre M.A.⁷, Campbell B. A.⁸, Carter L. M.,⁹ Smith B I.,¹⁰ Holt W.J.¹⁰, Smrekar, S. E.¹¹, Nunes D. C.¹¹, Plaut, J.J.¹¹, Anthony F. Egan, A.F.¹², Titus T.N.,³ Seu R. ¹³, (. 2011)**Massive CO₂ Ice Deposits Sequestered in the South Polar Layered Deposits of Mars**
/ www.scienceexpress.org / 21 April 2011 / Page 1 / 10.1126/science.1203091



Pike R.J (1974). **Why not an Extraterrestrial Geography?**. The Professional Geographer, 26:3, 258-261.

Pike R.J (1987) **Geography on the planets: gift of remote sensing**. The Professional Geographer, 39:2, 131-145.

Shinbrot T., Duong N.H., Kwan L., y Alvarez M.M (2004). **Dry granular flows can generate surface features resembling those seen in Martian gullies**. PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America) vol. 101 no. 23 pag. 8542-8546.

Shingareva Kira B, Zimbelman Jim., Buchroithner Manfred F, Hargita Henrik I. (2005). **The Realization of ICA Commission Projects on Planetary Cartography**. Journal Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization Volume 40, Number 4 /Winter 2005 University of Toronto Press1911-9925 (Online).

Sears d, Roe L. y Moore S. (2005). **Stability of water and gully formaton on Mars**. Lunar and Planetary Science XXXVI. 1496.

Scott, D. H., and K. L. Tanaka, (1986). **Geologic map of the western equatorial region of Mars**, U. S. Geological Survey Miscellaneous Invetigation Map I-1802-A,.

Spudis P. (2010). El misterio de la multiplicación del agua en la Luna.
http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2010/18mar_moonwater/

Stepinski T.F. and Collier M.L. (2003). **Grainage Densities of computationally extracted martian grainage basins**. Sixth International Conference on Mars. 3100.

Steward S.T y Nimmo F. (2002). **Surface runoff features on Mars: Testing the carbon dioxide formation hypothesis**. Journal of Geophysical Research. Vol. 107. No. E9. 5069

Strahler A. (1993). Geografía Física. 3a edición. Editorial Logi.

Tanaka, K. L., 1986. The stratigraphy of Mars. J. Geophys. Res. 91 (B13), E139–E158.

The Planetary Society Planetary News: Mars (2006). **“Mars Global Surveyor Discovers Current Liquid Water Activity on Mars”**, By Emily Lakdawalla December 6, 2006

Treiman A. H. (2003). **Geologic settings of Martian Gullies: Implications for their origins**. Journal of Geophysical Research. Vol. 108, No. E4, 8031.

Treiman A.H. y Louge M.Y. (2004). **Martian slope streaks and gullies: origins as dry granular flows**. Lunar and Planetary Science XXXV (2004) 1323.

Treiman H.A. (2005). **Martian gullies and groundwater: a series of unfortunate exceptions**. Lunar and Planetary Science XXXVI.

Treiman H.A. (2008) **Wind and the origin of Martian gullies: a local and regional test in Cimmeria**. Workshop on Martian Gullies: Theories and Tests. 8020.

Villers R. L., y López B. J. (1995). **Evaluación del uso agrícola y forestal del suelo en la cuenca del Río Temazcaltepec, Nevado de Toluca, México**. Investigaciones Geográficas. Boletín Núm 31. UNAM.

Wynn-Williams D.D., Cabrol N.A., Grim E.A. et al (2001). **Brines in seepage channels as eluants for subsurface relict biomolecules on Mars**. Astrobiology. Vol. 1 pp 165-184.

Carta topográfica esc 1:50 000 Volcán Nevado de Toluca Clave E-14-A-47 INEGI.

Carta geológica esc. 1:50 000 Volcán Nevado de Toluca

Apéndice 1

BARRANCOS MARCIANOS

Imágenes de: NASA/JPL/MSSS

Núm. Imagen	Ubicación	Coordenadas	cabecera	canal	abanico de detritos	Terreno geológico	citado en	Relieve cercano
M1401830	Gorgonium Chaos	168.3W 37.4S	0	0		Hap	Treiman	
E05-02006	North wall Hale crater	37.1W 35.0S				Aht	Treiman	
	Chryse Planitia	18.9W 38.9N				Had	Treiman	
M07-01015	Near Newton Basin	163.3W 46.4S				Apk	Treiman	dunas
M00-00053	Newton Basin	157.2W 42.2S				Had	Treiman	planicies, mantling
M08-05-076	Li fan crater	153.2W 47.2S		0	SI	Hap	Treiman	dunas
M07-03089	Li fan crater	153.5 W 47.1S		0	SI		Treiman.	dunas
MOC2-640	Crater in Cimmeria	191.6W 46.0S				Hdu	Treiman	
M10-013347	Maunder crater, Noachis	358.5W 49.4S				S	Treiman	
M07-05535	Small crater in Noachis	342.7W 54.8S	0	0		Nplr ? Hnu	Treiman	dunas
M23-01263	Crater in Utopia Planitia	40.94 S 240.14 W	0	0			Treiman	
M17-00207	Near Newton Basin	164.4W 39.2S	0	0		Hdu	Treiman	
E02-00874	Near Dao Vallis	263.9W 32.3S	no se ve	0		Aam? S. Hesp	Treiman.	
M18-01192	Pavonis Mons	113.0W 0.8N		0	no se ve	Had Amazon	Treiman	dunas. Devils
M14-00457	North wall Hale crater	36.6W 34.8S		0		Nplh	Treiman	
MOC2-671	Gorgonium Chaos E02-01674	174.7W 38.6S		0		Hf Hesp	Treiman	planicies
M19-014010	Utopia Planitia	254.8W 39.9N		0	SI	Hug	Treiman	
M08-02381	Hellas Basin	289.1W 48.7S		0		Nhi	Treiman	
M09-04718	Halle crater	36.8W 35.7S	0	0	SI	Hf	Treiman	
M14-01320	Gorgonium Chaos	169.5W 37.4S				Hf	Treiman	

M13-01582	Terra Sirenum	108.1W 57.7S	0	0		Nf	Treiman	
M18-01931	Near Mounder Crater, Noachis	354.4W 47.2N		0		Huk	Treiman (en todas direcciones)	
	Nirgal Vallis Tierras altas craterizadas	318°E 29°S				Hpl3, Npl, Npl2	Reiss 2004	
	Gorgonium Chaos	38.5 S 171.5				Hcht, d		
	Nirgal Vallis	39.0W 29.7S				Hh2 Nf	JGR vol.108 No. E4-2004	
M14-00457	North wall of Hale Crater	36.6W 35.0S	0	0		Hdu	JGR vol.108 No. E4-2006 y Tr.	
M21-00595	Pit in Rabe crater. M02-03078	326.1W 44.2S	0			Hnu	JGR vol.108 No. E4-2009 y Tr.	
E04-00704	Sisyphi Cavi	357.9W 70.9S		0			JGR vol.108 No. E4-2021	
M09-06567	North of Elysium Montes	198.4W 46.9N	0	0			JGR vol.108 No. E4-2022	

0 =si

1= no

No. imagen	Ubicación	Coordenadas	nicho	canal	abanico de detritos	Terreno geológico	citado en
MOC2-757	martian gullies	33.8 S 201.6 W				Npl	
MOC2-756	gullied trough wall	38.9 S 176.3 W				Nf	*
MOC2-322	athabasca vallis						*
	Kasei Vallis	31.1N 54.1W				Hap	*
MOC2-751=668		39.1 S 200.7W				Nplr	*
MOC2-746	Granicus Valles	27.4N 224.8 W				Ael	*
MOC2-941		70.9°S 357.3 W					*
MOC2-939	Noachis Pit Cráter	47.8 °S 354.9° W					*
MOC2-919		32.1 °S 12.9°W					
MOC2-914	small gullied crater	37.9S 169.3W				Hf	*
MOC2-814	mid-latitude gully features	39.7S 208.6W				Npl1	*
MOC2-799	Galle crater	51.9S 31.6W				Hr, ó Nplr	*

MOC2-787	martian gullies	46.6S 175.7W				Nf	*	
MOC2-728	Gullies in Noachis	32.1S 12.9W				Nf	*	
MOC2-720	martian gullies	35.5S 223.0W				Nm, m v	*	
MOC2-688	Newton Basin	41.9S 158.1W				Had	*	
MOC2-684	gullies in crater	39.8S 202.0W				Npl1, v	*	
MOC2-680	gullies with bright material	38.8S 40.3W				Hr	*	
MOC2-671	gullied slope	38.5S 174.5W				Hf	*	
MOC2-673	south polar pit gullies	71.1S 358.8W				Adl, v		
MOC2-647	Noachis Terra	50.1S 356.4W				Npld, v		
MOC2-640	Terra Cimmeria	37.7S 191.6W				v, Hnu		
MOC2-603	high-resolution view of gullies	46.7S 162.3W				Apk		
MOC2-585	Galle crater	51.8S 31.2W				Nplr		
MOC2-571	gullies in crater Hellas	44.5S 277.0W				v, b, sist de canales		
MOC2-554	multiple-event gully	51.3S 326.6W				Hh2, v		
MOC2-547	Galle crater scene	51.9S 31.4W				Nplr		
MOC2-535	gullies in Nirgal	28.6S 41.5W				s		
MOC2-470	martian gullies	35.3S 76.3W				Npl1		
MOC2-467	defrosting south polar slope	70.7S 358.2W				v, Adl		
MOC2-406	gullies in Terra Sirenum	39.1S 166.1W				Hnu		
MOC2-388	gullies in crater wall	39.0S 200.7W				Nplr, v		
MOC2-375	gullies in terraced crater wall	36.2S 185.5W				Hcht, v		
MOC2-371	Atlantis chaos	34.3S 178.0W				s		
MOC2-360	distribuitari channels	47.8S 355.6W				Had, v		
MOC2-327	spring defrosting of mass move...	70.9S 339.3W				Had, v		
MOC2-320	Newton basin y Sirenum Terra	42.2S 158.2W				Had		
MOC2-317	gullies in crater wall. Newton B.	41.8S 158.0W				Had		

[*http://www.msss.com/mars_images/moc/2004/06/14/](http://www.msss.com/mars_images/moc/2004/06/14/)

Apéndice 2

GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 38, L21202, doi:10.1029/2011GL049403, 2011

CO₂ gas fluidization in the initiation and formation of Martian polar gullies

Yolanda Cedillo-Flores,^{1,2} Allan H. Treiman,² Jeremie Lasue,^{2,3} and Stephen M. Clifford²

Mexico, Mexico City, Mexico.

²Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas, USA.

³Space Science and Applications, Los Alamos National Laboratory,
Los Alamos, New Mexico, USA.

Copyright 2011 by the American Geophysical Union.

0094-8276/11/2011GL049403

¹Auxiliary materials are available in the HTML. doi:10.1029/
2011GL049403.

GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 38, L21202, doi:10.1029/2011GL049403, 2011
L21202

[1] Martian gully landforms, indicative of rapid flow of sediment down steep slopes, have been cited as evidence of the action of near-surface liquid water in Mars' recent past.

Gullies in polar regions cannot involve pure liquid water because ambient temperatures are too low. Here, we show that polar gullies could be initiated by fluidization of sediment over a subliming seasonal deposit of CO₂ frost, as has been proposed previously. For gullies in sand, the gas speed and CO₂ sublimation rate required for fluidization is calculated with the semi-empirical Ergun relation (as validated in industrial applications). For gullies in dust, the gas speed and sublimation rate required for fluidization are estimated from laboratory experiments with comparable materials. To determine if those rates can be achieved, we compute diurnal and seasonal surface (and subsurface) temperatures through a Martian year (including CO₂ condensation and sublimation) using the MARSTHERM one-dimensional finite difference thermal model. Models were run without sediment, and with layers of sand or dust 10–4–10–1 m thick deposited over a seasonal layer of CO₂ frost. The simulations show that, in the spring, sufficient heat reaches the CO₂ frost, underlying the surface sediment layer, to fluidize them. This result confirms that Martian gullies may have diverse origins – and that polar and mid-latitude gullies can be initiated on steep slopes by the fluidization of loose sediment on a sublimating seasonal deposit of CO₂ gas.

Citation: Cedillo-Flores, Y., A. H. Treiman, J. Lasue, and S. M. Clifford (2011), CO₂ gas fluidization in the initiation and formation of Martian polar gullies, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L21202, doi:10.1029/2011GL049403.

2.3. Thermal Model

[14] To compute diurnal and seasonal surface (and subsurface) temperature variations (including the condensation and sublimation of CO₂) throughout the Martian year we used the one-dimensional finite difference thermal model MARSTHERM [Clifford and Bartels, 1986], see auxiliary material. MARSTHERM considers heat transfer only by conduction, assumes that the CO₂ frost and sediment layers are homogeneous, and that the latter are optically opaque to visible and thermal radiation. For these reasons, and those of computation time, our MARSTHERM models are restricted to layers of 300 mm and thicker. [15] Using MARSTHERM, we modeled the geological circumstances described above for climate conditions representative of the current epoch. In winter, slopes accumulate CO₂ frost; a layer of sediment (if present) is emplaced instantaneously onto a winter's thickest accumulation of CO₂ frost (Figure S3); sublimation of that CO₂ frost is

tracked through spring and summer until the frost vanishes (Figure S3). The tested models, Figure 1, are for pole-facing slopes of 25° at latitudes of 75°N and S, with no sediment mantle and with mantles of 300 mm to 10 cm thicknesses of sand or dust (results for 300mm, not shown, are nearly identical to those for 1 mm).

Figures 1a and 1b show maximum daily sublimation rates as functions of season; Figures 1b and 1c show hourly rates during the day of maximum sublimation. [16] The low albedo of the overlying sediment causes the CO₂ frost to sublimate rapidly, because of its greater absorption of solar heat. This creates conditions that are conducive to the fluidization of the sediment by the sublimation of underlying CO₂ frost. For all cases, sublimation

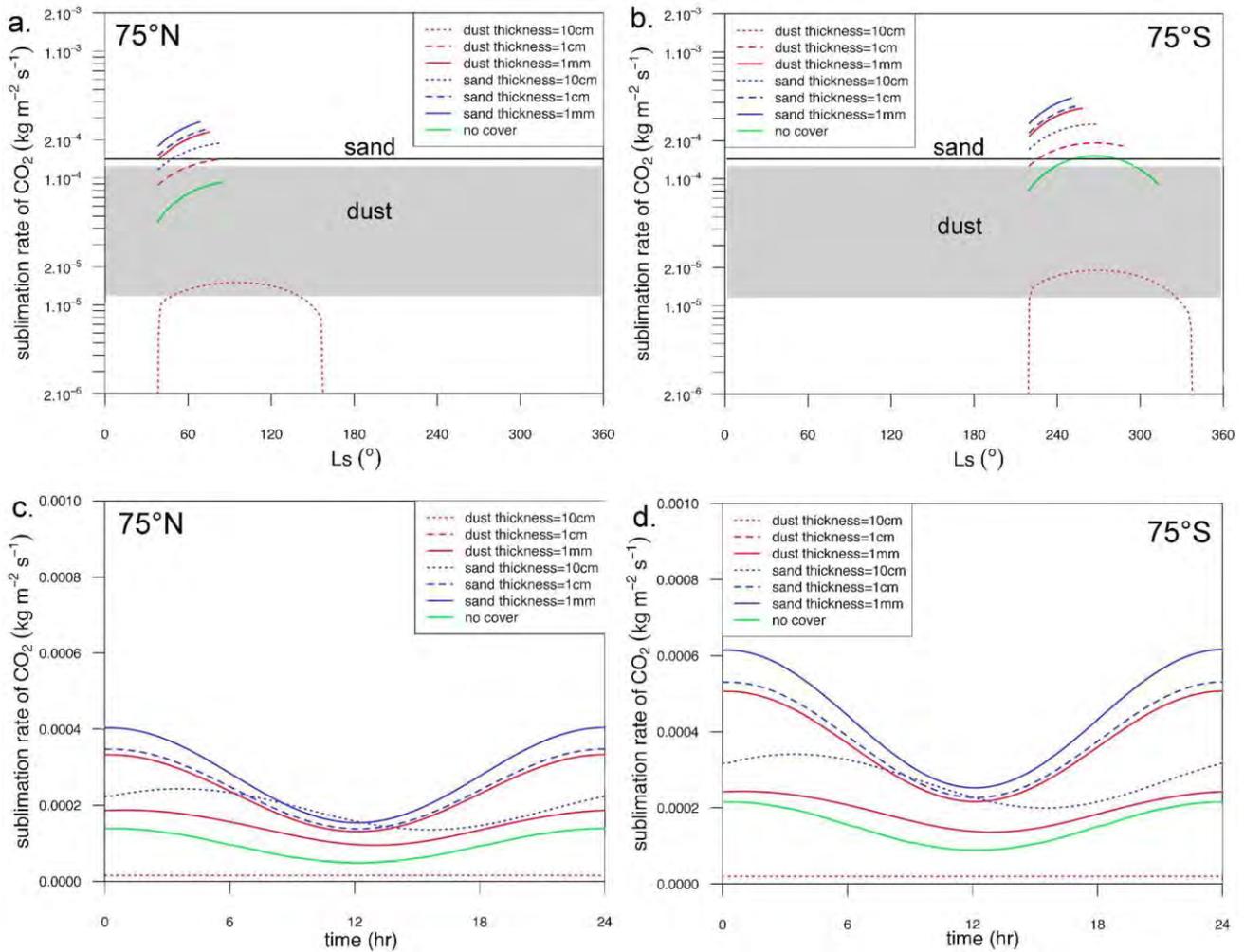


Figure 1. Results of MARSTHERM calculations of sublimation rates on pole-facing slopes of 25° for (a and c) 75°N latitude and (b and d) 75°S latitude for a range of thicknesses of eolian sand and dust. Calculations for thicknesses of 300 mm are essentially coincident with those for 1 mm, and are not shown for clarity. Figures 1a and 1b show daily average sublimation rates over a Martian year (Ls 0° to 360°). The curves terminate when CO₂ frost equivalent to an annual winter deposit has sublimated away. Figures 1a and 1b also show the threshold sublimation rates to fluidize dark sand (solid line) and light-tone dust (gray field). Figures 1c and 1d show sublimation rates during the single day of maximum sublimation. For Figure 1c, the days of maximum sublimation rates are at Ls =: 98.3° for 10 cm of dust; 95.6° 1 cm of dust; 75.2° for 1 mm of dust; 83.3° for 10 cm of sand; 72.6° for 1 cm of sand; 68.5° for 1 mm of sand; and 95.4° when no sediment is

present. For Figure 1d, the days of maximum sublimation rates are at $L_s =$: 268° for 10 cm of dust; 268° 1 cm of dust; 258° for 1 mm of dust; 268° for 10 cm of sand; 257° for 1 cm of sand; 250° for 1 mm of sand; and 268° when no sediment is present.

3. Conclusion [19] These results (Figure 1) show that thin layers of eolian sediment deposited over a seasonal accumulation of CO₂ frost could be fluidized by sublimation of that frost. Once fluidized, the sediment will flow and could potentially produce the massive flows represented now by polar gullies [Hoffman, 2002; Cedillo-Flores et al., 2008; Hansen et al., 2011]. Fluidization is predicted to occur in the early spring, coinciding with the observed occurrences of seasonal gully activity [Diniaga et al., 2010; Dundas et al., 2010; Hansen et al., 2011]. Because CO₂ frosts can be deposited locally at intermediate to low latitudes [Schorghofer and Edgett, 2006], fluidization from sublimation of those frosts could thus initiate gully formation across most of Mars. Gullies in polar and temperate latitudes show similar ranges of sizes and morphologies [Malin and Edgett, 2000; Hoffman, 2002], which is consistent with formation by a common mechanism (i.e., gas fluidization. However, similar gully morphologies can also arise in liquid-rich flows [e.g., Hartmann et al., 2003; Coleman et al. 2009; Kolb et al., 2010] which suggests that gullies can be initiated by multiple processes – and that, once begun, flow processes in gully-forming avalanches are independent of the initiation mechanism. [20]

Acknowledgments. This work was done at the Lunar and Planetary Institute, under a fellowship to the first author from the Secretaría de Educación Pública, Republica de Mexico, under the “Programa de Apoyo al Posgrado Beca Bicentenario de Alta Competencia para Posgrado e Investigación en el Extranjero, Ciclo 2010.” We are grateful for assistance from J. Gross, for constructive reviews from S. Byrne and an anonymous expert, and editorial handling by P. D’Odorico. Lunar and Planetary Institute contribution 1638.

[21] The Editor thanks the two anonymous reviewers.