



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis geológico de la región Oxia Planum en Marte, sitio principal de aterrizaje de la Misión ExoMars 2020

**TESIS**

Que para obtener el título de

Ingeniera Geóloga

**P R E S E N T A**

Karen Itzel Reyes Ayala

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Primož Kajdič



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016.

## *Jurado asignado*

**Presidente:** Dr. Jaime Humberto Urrutia Fucugauchi

**Vocal:** Dr. Primož Kajdič

**Secretario:** Dr. Dante Jaime Morán Zenteno

**Primer suplente:** Dr. Héctor Javier Durand Manterola

**Segundo suplente:** Dr. Enrique Alejandro González Torres

**Director de tesis:**

---

Dr. Primož Kajdič

**Asesores externos:**

Dr. Jorge L. Vago (European Space Agency)

Dr. Olivier Witasse (European Space Agency)

*A José Anselmo Reyes León †*

*Mi más sincero agradecimiento al European Space Research and Technology Centre (ESTEC) de la Agencia Espacial Europea por brindarme la oportunidad de participar en el Third ExoMars 2018 Landing Site Selection Workshop y permitirme el acceso al material disponible para realizar este trabajo.*



## *Agradecimientos*

***Tere y Carlos.*** Soy tan afortunada de tenerlos como padres, gracias por educarme con buenos principios y hacerme la persona que soy en la actualidad.

Sus palabras de aliento nunca me dejaron caer, sus grandes sacrificios hoy pueden verse reflejados en este logro.

Gracias por sus ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan y que me han infundado siempre. El orgullo que sienten por mí fue lo que me hizo llegar hasta el final. ¡Los amo!

***Dr. Primož Kajdič.*** Gracias por haberme adentrado en el estudio de las Ciencias Espaciales, por creer en mis capacidades y haber hecho posible mi estancia en ESTEC.

Le agradezco infinitamente el haber dirigido este trabajo y su apoyo incesante a lo largo de este proceso. Gracias por compartir su conocimiento conmigo y por la revisión minuciosa que perfeccionó mi tesis.

***Dr. Jorge L. Vago.*** Fue para mí una de las experiencias más gratas de mi vida poder asistir al Third ExoMars 2018 Landing Site Selection Workshop. Es por ello que le agradezco por la gran oportunidad, las facilidades prestadas en ESTEC y por proporcionarme la información de la Misión.

Gracias por sus excelentes sugerencias para mi tesis, por estar siempre dispuesto a responder a todas mis dudas pero sobre todo gracias por su gran calidad humana que me hizo sentir en casa en un país tan lejano. Agradezco que se haya tomado el tiempo en recibirme y verificar que mi estancia fuera lo más amena posible. Usted y su familia son muy amables.

**Dr. Olivier Witasse.** Je souhaite vous exprimer mes sincères gratitudee concernant votre soutien lors de mon séjour passé dans le "European Space Research and Technology Centre". Assister au "Third ExoMars 2018 Landing Site Selection Workshop" fut pour moi l'une des expériences les plus gratifiantes de ma vie.

Merci d'avoir montré votre soutien et suivre le processus. Je vous remercie du temps que vous avez accordé sur mes thèmes et vos suggestions sur différents points qui m'ont permises de donner forme à mon travail.

**Dr. Enrique Alejandro González Torres.** Gracias por sus consejos y sugerencias que me permitieron utilizar de manera óptima el material que tenía disponible. Le agradezco por estar siempre al tanto del avance de mi tesis y por estar dispuesto en todo momento a ayudarme.

**Dr. Jaime Urrutia Fucugauchi, Dr. Dante Jaime Morán Zenteno y Dr. Héctor Javier Durand Manterola.** Gracias por aceptar ser parte del jurado, tomarse el tiempo en revisar mi escrito, por sus observaciones y sus sugerencias que lo mejoraron.

Finalmente agradezco a la **Universidad Nacional Autónoma de México** por brindarme una gran formación académica desde Iniciación Universitaria, gracias a todos mis profesores que contribuyeron a ello.

## *Resumen*

Oxia Planum es una región marciana perteneciente al cuadrilátero Oxia Palus localizado al este de la región Chryse Planitia y al suroeste de Arabia Terra, situado en las coordenadas 18.20°N, 335.45°E. Ha sido electo como sitio principal de aterrizaje de la Misión ExoMars 2020 de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Agencia Espacial Federal Rusa (ROSCOSMOS), cuyo objetivo primordial es hallar rastros de actividad biológica pasada o presente en Marte, extrayendo muestras de hasta 2 metros de profundidad.

Esta tesis presenta el análisis geológico de una parte de Oxia Planum comprendida entre las elipses de aterrizaje propuestas por la ESA con dimensiones de 104 km por 19 km. Con el fin de ver las posibilidades que tiene ExoMars 2020 de hallar alguna biofirma.

Se estudiaron un total de once imágenes obtenidas a través de la Context Camera (CTX), High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE), Mars Orbiter Camera (MOC) y datos del espectrómetro Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM).

Se encontró que el sitio contiene evidencias indudables de que el agua líquida corrió por la superficie del Planeta Rojo:

1. Capas de filosilicatos (vermiculita, montmorillonita, nontronita, saponita) cubren todo el área indicando una alteración hídrica.
2. Canales invertidos y canales de desbordamiento de aproximadamente 3.7 Ga de edad están marcados en la zona.
3. Todo indica la presencia de un delta que tuvo su origen en el Hesperiano (~3.7 Ga)
4. Recientes flujos de lava cubrieron partes de la zona pero la erosión ha exhumado depósitos antiguos que pueden tener algunas biofirmas.

Con base en la edad de las capas de filosilicatos, los canales y el posible delta, se estima que el agua líquida estuvo presente en Oxia Planum durante unos 200 millones de años (suponiendo que el agua haya fluido continuamente y no solo por episodios). Siendo así, el agua líquida estuvo presente en Oxia Planum en el Noachiano ~3.9 Ga y se prolongó hasta inicios del Hesperiano ~3.7 Ga.

Es en los canales de desbordamiento y en el delta donde las cantidades de agua debieron ser mayores, lo que podría favorecer el desarrollo de actividad biológica en esa zona.

## *Abstract*

Oxia Planum is a Martian region belonging to the quadrangle Oxia Palus located at the east of the region Chryse Planitia and the south west of Arabia Terra, in the coordinates 18.20°N, 335.45°E. It has been selected as the primary candidate for the landing site of the ExoMars 2020 mission of the European Space Agency (ESA) and Russian Federal Space Agency (ROSCOSMOS), which its principal objective is to find past or current traces of biological activity in Mars, extracting samples from various depths, down to a maximum of two meters.

This thesis presents the geologic analysis of an Oxia Planum's part that is comprised between the landing ellipses proposed by ESA with the dimensions of 104 km by 19 km. The latter, in order to observe the possibilities ExoMars 2020 has of finding any biosignature.

Eleven images were studied and obtained through the Context Camera (CTX), the High Resolution Imaging Science Experiment, the Mars Orbiter Camera (MOC) and data from of the Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM).

It was found that the place contains undoubted evidences that liquid water ran on the surface of the Red Planet:

1. Phyllosilicates layers (vermiculite, montmorillonite, nontronite, and saponite) cover the area indicating a water alteration.
2. Inverted channels and outflow channels of approximately 3.7 Gy of age are marked in the area.
3. Everything indicates the presence of a delta fan that had its origin in the Hesperian (~3.7 Gy)
4. Recent lava flows covered parts of the area but the erosion has exhumed ancient deposits that can have some biosignatures.

Based on the age of the phyllosilicates layers, the channels and the possible delta fan, it is believed that the liquid water was present at Oxia Planum during approximately 200 million years (supposing that the water has flown continuously and not only during episodes). Being like that, the liquid water was present in the Oxia Planum region in the Noachian (~3.9 Gy) and extended until the beginnings of the Hesperian (~3.7 Gy).

It is in the outflow channels and delta fan where the water quantities should have been major, situation that has favored the development of biological activity in this area.



# Contenido

<b>Introducción</b> .....	1
---------------------------	---

## **Capítulo 1. Antecedentes**

1.1 Características generales del Planeta Marte .....	3
1.2 Dicotomía marciana .....	5
1.3 Capas de Marte.....	7
1.3.1 Corteza marciana .....	8
1.3.2 Manto marciano.....	10
1.3.3 Núcleo marciano.....	10
1.4 Historia geológica de Marte .....	11
1.4.1 Pre- Noachiano (hace 4.5-4.1 mil millones de años).....	11
1.4.2 Noachiano (hace 4.1-3.7 mil millones de años) .....	12
1.4.3 Hesperiano (hace 3.7-2.9 mil millones de años) .....	12
1.4.4 Amazoniano (hace 2.9 mil millones de años- presente).....	13
1.4.5 Clasificación según Bribing (2006).....	13

## **Capítulo 2. Agua líquida en el pasado de Marte**

2.1 Procesos fluviales.....	17
2.1.1 Canales marcianos .....	18
2.1.2 Abanicos aluviales.....	22
2.1.3 Deltas.....	24
2.2 Morfologías invertidas .....	25
2.2.1 Eskers .....	26
2.3 Duración del agua líquida en Marte .....	27

## **Capítulo 3. ExoMars 2020**

3.1 Instrumentos a bordo de la Misión ExoMars 2020 .....	30
3.1.1 Cámara panorámica Pan-Cam .....	31

3.1.2 Espectrómetro Infrarrojo ExoMars ISEM .....	33
3.1.3 Close Up Imager CLUPI .....	33
3.1.4 Water Ice and Subsurface Deposit Observation on Mars WISDOM .....	35
3.1.5 Mars Multispectral Imager for Subsurface Studies Ma-MISS .....	36
3.1.6 MicrOmega.....	37
3.1.7 Espectrómetro Raman .....	38
3.1.8 Mars Organic Molecule Analyser MOMA.....	38
3.2 Sitios de aterrizaje para la Misión ExoMars 2020 .....	40
3.2.1 Mawrth Vallis.....	41
3.2.2 Hypanis Vallis .....	42
3.2.3 Aram Dorsum .....	42
3.3 Elección del sitio final de aterrizaje .....	43

#### ***Capítulo 4. Oxia Planum***

4.1 División de la superficie de Marte .....	45
4.2 Oxia Palus .....	48
4.3 Oxia Planum.....	49
4.3.1 Contexto general de Oxia Planum.....	49
4.3.2 Eclipse de aterrizaje para Oxia Planum.....	49
4.3.3 Mineralogía.....	52
4.3.4 Historia geológica.....	58

#### ***Capítulo 5. Análisis geológico de Oxia Planum***

5.1 Metodología .....	59
5.1.1 Selección de imágenes.....	60
5.1.2 High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE) .....	60
5.1.3 Context Camera (CTX) .....	61
5.1.4 Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM).....	61
5.2 Antecedentes geológicos .....	62
5.3 Análisis del sector 1 .....	64

5.3.1 Resultados para el sector 1 .....	66
5.4 Análisis del sector 2 .....	68
5.4.1 Resultados para el sector 2 .....	71
5.5 Análisis sector 3 .....	72
5.5.1 Resultados para el sector 3 .....	79
<b>Capítulo 6. Discusiones y conclusión</b>	
6.1 Posibilidades de encontrar evidencias de vida presente o pasada en Oxia Planum ....	80
6.2 Ruta sugerida para ExoMars 2020 .....	81
6.3 Conclusiones .....	84
<b>Referencias</b> .....	85
Referencias electrónicas .....	88
Presentaciones consultadas .....	89
Apéndice 1. Imágenes obtenidas por HiRISE .....	90
Apéndice 2. Imágenes obtenidas por CTX .....	92
Apéndice 3. Imágenes obtenidas por CRISM.....	94
Apéndice 4. Parámetros espectrales de CRISM .....	96
Apéndice 4.1 Parámetros espectrales de CRISM para el sector 1 .....	97
Apéndice 4.2 Parámetros espectrales de CRISM para el sector 2 .....	99
Apéndice 4.3 Parámetros espectrales de CRISM para el sector 3 .....	100
Apéndice 5. Imágenes para ser analizadas con lentes 3D.....	103
<b>Glosario</b> .....	107

## *Lista de figuras*

Figura 1.1 Mapa topográfico de Marte. ....	5
Figura 1.2 Polo norte marciano. Se muestra la cuenca Borealis.....	6
Figura 1.3 Modelo de las capas de Marte. ....	7
Figura 1.4 Espesor de la Corteza de Marte.....	9
Figura 1.5 Eras geológicas de Marte .....	14
Figura 2.1 Paraná Valles, red de canales de escorrentía en Noachis Terra .....	19
Figura 2.2 Canales de escorrentía en Nanedi Valles. ....	20
Figura 2.3 Ravi Vallis. Canal de desbordamiento. ....	21
Figura 2.4 Reull Vallis. Canal corroído.....	22
Figura 2.5 Perfil longitudinal y partes de un abanico aluvial .....	23
Figura 2.6 Abanico aluvial presente en un cráter marciano de baja latitud.....	24
Figura 2.7 Delta en el cráter Eberswalde.....	25
Figura 2.8 Canal invertido en Mangala Valles. ....	26
Figura 2.9 Esker glaciar en la Tierra.....	27
Figura 3.1 Rover ExoMars.....	29
Figura 3.2 Partes del Rover ExoMars.....	30
Figura 3.3 Rover Inspection Mirror.....	32
Figura 3.4 Perfiles de transmisión para los filtros propuestos para la Pan-Cam .....	32
Figura 3.5. ISEM, modelo 3D y esquema óptico.....	33
Figura 3.6 CLUPI .....	34
Figura 3.7 Unidad electrónica y antenas, WISDOM .....	35
Figura 3.8 Las pruebas Ma-MISS.....	36
Figura 3.9 Espectrómetro MicrOmega .....	37
Figura 3.10 MOMA .....	39
Figura 3.11 Sitios de aterrizaje propuestos para ExoMars 2018 .....	40
Figura 4.1 Mapa de la superficie de Marte dividida en cuadriláteros.....	47
Figura 4.2 Oxia Planum .....	50
Figura 4.3 Elipse propuesta para el aterrizaje en 2020 .....	51

Figura 4.4 Rango de elevación en Oxia Planum.....	51
Figura 4.5 Espectrómetro CRISM. ....	52
Figura 4.6 Valores de reflectancia obtenidos por CRISM al noroeste de Oxia Planum....	53
Figura 4.7 Valores de reflectancia obtenidos por CRISM al centro de Oxia Planum. ....	54
Figura 4.8 Valores de reflectancia obtenidos por CRISM al sureste de Oxia Planum. ....	55
Figura 4.9 Obtención de la edad de Oxia Planum .....	58
Figura 5.1 Imágenes disponibles dentro de las elipses de aterrizaje en Oxia Planum.....	59
Figura 5.2 Imágenes elegidas en Oxia Planum.....	62
Figura 5.3 Unidades geológicas detectadas en Oxia Planum .....	63
Figura 5.4 Unidades geológicas en sector 1 .....	64
Figura 5.5 Flujo de lava y filosilicatos en sector 1 .....	65
Figura 5.6 Perfil de elevación A-B. ....	65
Figura 5.7 Estimaciones de las edades con base en la densidad de cráteres.....	66
Figura 5.8 Filosilicatos en el sector central .....	68
Figura 5.9 Cráteres en el sector central.....	69
Figura 5.10 Perfil de elevación C-D. ....	70
Figura 5.11 Perfil de elevación E-F. ....	70
Figura 5.12 Sector 3 al sureste de las elipses de aterrizaje.. ....	72
Figura 5.13 Canales en sector 3 .....	73
Figura 5.14 Perfil de elevación G-H. ....	73
Figura 5.15 Perfil de elevación I-J.....	74
Figura 5.16 Canales invertidos en el sector 3. ....	75
Figura 5.17 Perfil K-L. ....	76
Figura 5.18 Delta en el sector 3. ....	77
Figura 5.19 Delta en el sector 3 comparado con el Delta Eberswalde .....	78
Figura 6.1 Ruta sugerida para ExoMars 2020. ....	83

## *Lista de tablas*

Tabla 1.1 Comparación de características entre el planeta Marte y la Tierra.....	4
Tabla1.2 Tabla comparativa entre los eventos entre Marte y la Tierra. ....	15
Tabla 2.1 Canales de Marte. ....	18
Tabla 3.1 Comparación entre las propiedades de cada sitio de aterrizaje propuesto.....	44
Tabla 4.1 Cuadriláteros de Marte .....	46
Tabla 4.2 Posibles minerales en Oxia Planum.....	57
Tabla 5.1 Cráteres de impacto en Marte .....	69
Tabla 7.1 Parámetros espectrales detectados por CRISM .....	96

## *Introducción*

Más de 40 misiones se han enviado a Marte y han proporcionado datos importantes sobre su formación. Se tiene la certeza de que el planeta alguna vez fue activo geológicamente, teniendo procesos muy similares a los que ocurren en la Tierra, mostrando volcanes, redes de valles, dunas, erosión hídrica, entre otros. Sin embargo, las condiciones marcianas como la diferencia de tamaño, la composición actual de la atmósfera, la gravedad y la temperatura hacen que difiera mucho de la Tierra.

Establecer si alguna vez existió vida en Marte es una de las cuestiones científicas sobresalientes de nuestro tiempo. Para intentar responderla, la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Agencia Espacial Federal Rusa (ROSCOSMOS) iniciaron el programa ExoMars que investigará el ambiente marciano y abrirá el camino a una futura misión que pueda retornar muestras de Marte.

El sitio elegido por la ESA para el aterrizaje de ExoMars en 2020 es Oxia Planum. Se localiza principalmente en terrenos de edad noachiana, donde se ha detectado la presencia de minerales hidratados y redes de valles.

### ■ *Objetivos*

El propósito de este trabajo es describir el futuro sitio de aterrizaje Oxia Planum, analizando la morfología y los minerales presentes en la zona, esencialmente los que indiquen interacción con agua líquida, con el fin de reconstruir la historia geológica y ver las posibilidades que tiene la Misión ExoMars 2020 de encontrar algún vestigio de vida presente o pasada.

■ *Justificación*

La presencia de minerales hidratados y redes de canales convierten a Oxia Planum en un sitio con un potencial alto para desarrollar vida, debido a que el agua es un elemento importante para generarla.

■ *Metas y metodología empleada*

Se establecieron los siguientes puntos con el fin de alcanzar el objetivo principal del trabajo.

1. Recopilación de información general de Marte en publicaciones científicas disponibles al público.
2. La información específica de Oxia Planum y la Misión ExoMars 2020 me fue proporcionada por la Agencia Espacial Europea durante la estancia que realicé en el European Space Research and Technology Centre (ESTEC) en los Países Bajos con autorización para usarla.
3. Se llevó a cabo la búsqueda de imágenes con buena resolución de Oxia Planum provenientes de diversas bases de datos principalmente de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Agencia Espacial Estadounidense (NASA).
4. Se recopilaron los datos del espectrómetro Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) para la zona Oxia Planum.
5. Se realizaron perfiles de elevación en *mars.nasa.gov* para analizar algunas características del terreno.



# 1 | Antecedentes

## *1.1 Características generales del Planeta Marte*

Los planetas tipo terrestres son los más cercanos al Sol, más densos y rocosos. En este grupo se encuentran Mercurio, Venus, Tierra y Marte. Este último ocupa el cuarto lugar en relación a la distancia con el Sol y después de Venus, es el más cercano a la Tierra.

Marte se encuentra en una órbita alrededor del Sol de 1.66 Unidades Astronómicas (UA) ó 228, 000,000 kilómetros. El diámetro del planeta rojo es aproximadamente la mitad del de nuestro planeta, con un radio promedio de 3, 397 kilómetros. El planeta tiene un núcleo, manto y corteza. El núcleo se constituye de aleaciones de hierro con níquel; el manto por silicatos de hierro y magnesio, y la corteza de rocas ígneas en su mayoría.

La atmósfera marciana contiene principalmente dióxido de carbono (95.32%), seguido de nitrógeno (2.7%), argón (1.6%) y en partes muy pequeñas (menores al 1%) de oxígeno, vapor de agua y óxido nítrico.

La inclinación del eje de rotación de Marte es de 25°. La órbita marciana es más elíptica que la de la Tierra con el perihelio a 206.5 millones de kilómetros y el afelio a 249.1 millones de kilómetros. La temperatura en su superficie varía entre 25°C y -125°C, dependiendo la época del año. A diferencia de la Tierra que solo cuenta con un satélite natural, Marte tiene a Phobos y Deimos. En la tabla 1.1 se comparan las características de Marte y la Tierra.

A pesar de que la literatura general trata a Marte y Tierra como planetas similares, la evolución geológica del planeta vecino fue totalmente diferente. Al tener un tamaño menor, Marte se puede enfriar y calentar con mayor rapidez (Zuber, 2001).

<i>Característica</i>	<i>Tierra</i>	<i>Marte</i>
<i>Composición de la atmósfera</i>	<i>Nitrógeno 77% Oxígeno 21% Argón 1% Dióxido de carbono 0.038%</i>	<i>Dióxido de carbono 95.32% Nitrógeno 2.7% Argón 1.6% Oxígeno 0.13% Vapor de agua 0.03% Óxido nítrico 0.01%</i>
<i>Presión atmosférica</i>	<i>1,013 milibares (a nivel del mar)</i>	<i>7.5 milibares (promedio)</i>
<i>Distancia al Sol</i>	<i>149,597,891 kilómetros 1 UA</i>	<i>227,936,637 kilómetros 1.66 UA</i>
<i>Radio ecuatorial</i>	<i>6,378 kilómetros</i>	<i>3,397 kilómetros</i>
<i>Gravedad</i>	<i>9.78 m/s<sup>2</sup> 2,66 veces mayor que la de Marte</i>	<i>3.71 m/s<sup>2</sup> 0.375 la de la Tierra</i>
<i>Duración de un día (tiempo necesario para hacer una rotación completa sobre su eje)</i>	<i>24 horas (Día solar)</i>	<i>24 horas, 37 minutos (1 sol)</i>
<i>Duración de un año (tiempo necesario para completar una órbita alrededor del Sol)</i>	<i>365.26 días</i>	<i>687 días terrestres</i>
<i>Casquetes polares</i>	<i>Cubiertos de hielo de agua.</i>	<i>Cubierto con una mezcla de hielo de dióxido de carbono y agua helada.</i>
<i>Temperatura en la superficie promedio</i>	<i>14 grados C 278.15 Kelvin</i>	<i>-63 grados C 210.15 Kelvin</i>
<i>Inclinación del eje</i>	<i>23.45°</i>	<i>25°</i>
<i>Satélites</i>	<i>1 (Luna)</i>	<i>2 ( Phobos y Deimos)</i>

*Tabla 1.1 Comparación de características entre el planeta Marte y la Tierra. Modificado de <http://phoenix.lpl.arizona.edu/mars111.php>*

## 1.2 Dicotomía marciana

La figura 1.1 muestra la topografía de Marte. Se puede apreciar una clara diferencia entre los hemisferios norte y sur. A estas “dos caras de Marte” se le conoce como dicotomía. En el hemisferio sur hay un terreno excavado por cráteres y su altitud promedio es de 2000 metros MOLA<sup>1</sup>. En el hemisferio norte se encuentran tierras bajas, con una altitud promedio de -4000 metros MOLA y poca presencia de cráteres (Neumann et al. 2004).

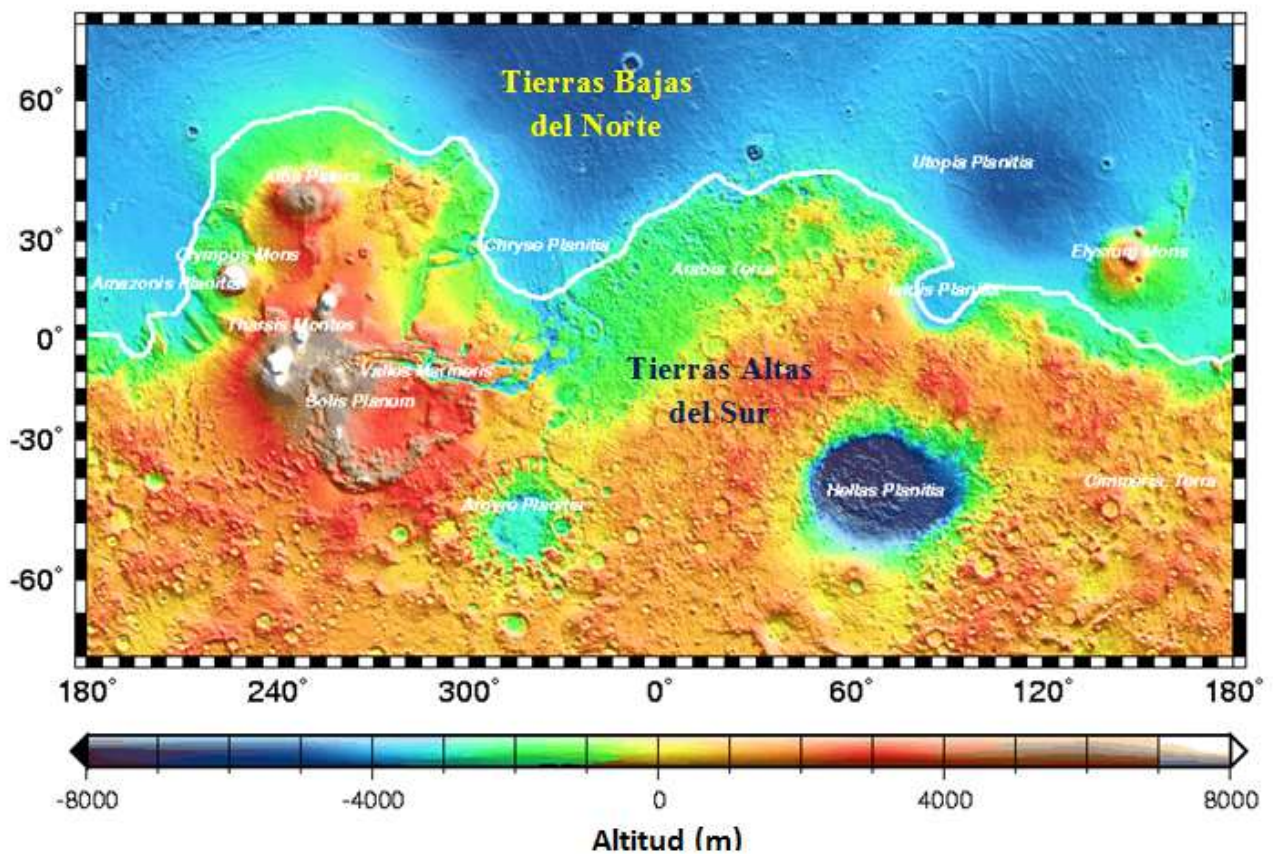


Figura 1.1 Mapa topográfico de Marte. Se puede apreciar la dicotomía Norte-Sur. Modificado de NASA/JPL/GSFC. Mars Global Surveyor. [http://mola.gsfc.nasa.gov/images/topo\\_labeled.jpg](http://mola.gsfc.nasa.gov/images/topo_labeled.jpg). 1999

<sup>1</sup> El instrumento llamado MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) de la NASA, lanzaba un haz de luz a la superficie de Marte y medía el tiempo que tardaba en regresar la señal hasta él. Estas distancias se convirtieron después en altitudes relativas de acuerdo con la altitud media de la superficie, es por ello que existen altitudes negativas (Hartmann. 2003).

El modo de formación de la dicotomía es incierto. La hipótesis más aceptada sugiere que un impacto, posiblemente de un asteroide, hace 3.9 Ga provocó la expulsión de lava fundida que borró en el norte el rastro de cráteres de impacto (Marinova et al. 2008). Se considera a la cuenca Borealis con dimensiones de 8.500 kilómetros de anchura y 10,600 de longitud como el lugar del impacto debido a sus grandes dimensiones y su localización en el hemisferio norte (Figura 1.2).

Golabek et al. (2011) proponen que la dicotomía se debe a procesos tanto endógenos como exógenos, según ellos el impacto del asteroide provocó el ascenso de material caliente proveniente del manto y aplanó el hemisferio norte. A diferencia de Marinova et al. (2008) estos autores no sugieren el posible lugar del impacto.

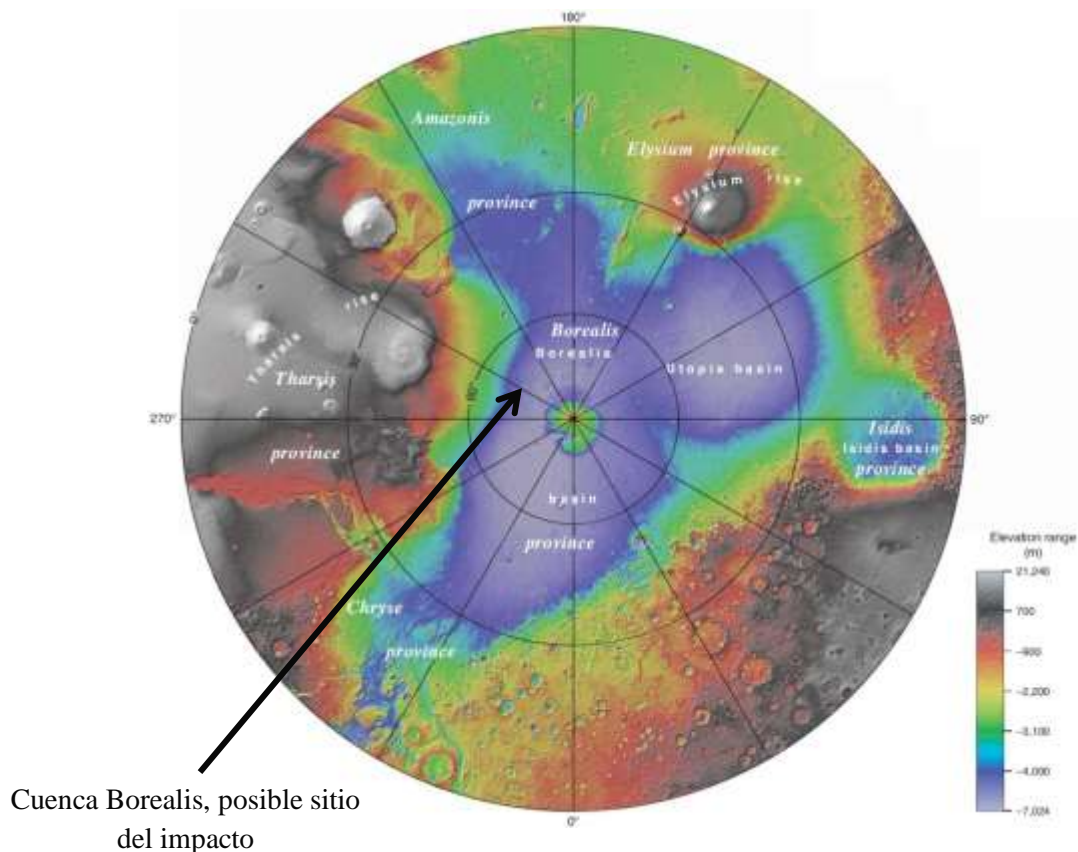


Figura 1.2 Polo norte marciano. Se muestra la cuenca Borealis, posible lugar del impacto. Tomado de USGS <http://pubs.usgs.gov/sim/2005/2888>. 2005

### 1.3 Capas de Marte

Todos los planetas terrestres contienen 3 capas principales, un núcleo de hierro, seguido de un manto silicatado y una capa químicamente distinta al manto llamada corteza (Nimmo & Tanaka, 2005).

Se piensa que debido a la acreción rápida de Marte su interior se pudo haber fundido, lo que causó la diferenciación del núcleo, la corteza y del manto. La Figura 1.3 muestra un modelo de las capas de Marte.

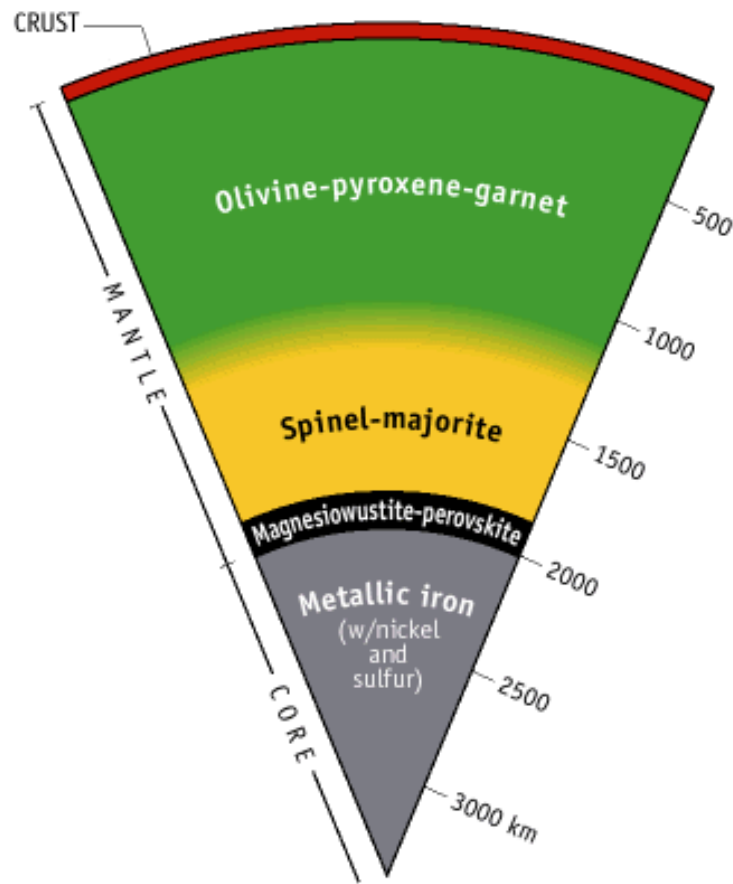


Figura 1.3 Modelo de las capas de Marte. Tomado de <http://www.psr.d.hawaii.edu/Oct12/Mantle-of-Mars.html>. 2012

### *1.3.1 Corteza marciana*

La corteza de Marte tiene un grosor aproximado de 50 kilómetros (Figura 1.4). Fue formada debido a la fusión de la parte superior del manto dándole una composición basáltica.

Las rocas de la corteza de Marte han sido subdivididas de acuerdo a su edad y las relaciones con los cráteres. Las más antiguas fueron formadas durante el Noachiano (hace 4.1-3.7 mil millones de años). Estas rocas comprenden los principios de la corteza.

La superficie marciana está compuesta de una mezcla de rocas ígneas cubiertas por productos de la meteorización que son altamente oxidados y que constituyen el suelo con un polvo relativamente brillante (Zuber, 2001). El característico color rojo de Marte se debe a la presencia de capas de minerales de hierro, con la capa superficial oxidada. La superficie muestreada in situ carece de compuestos orgánicos.

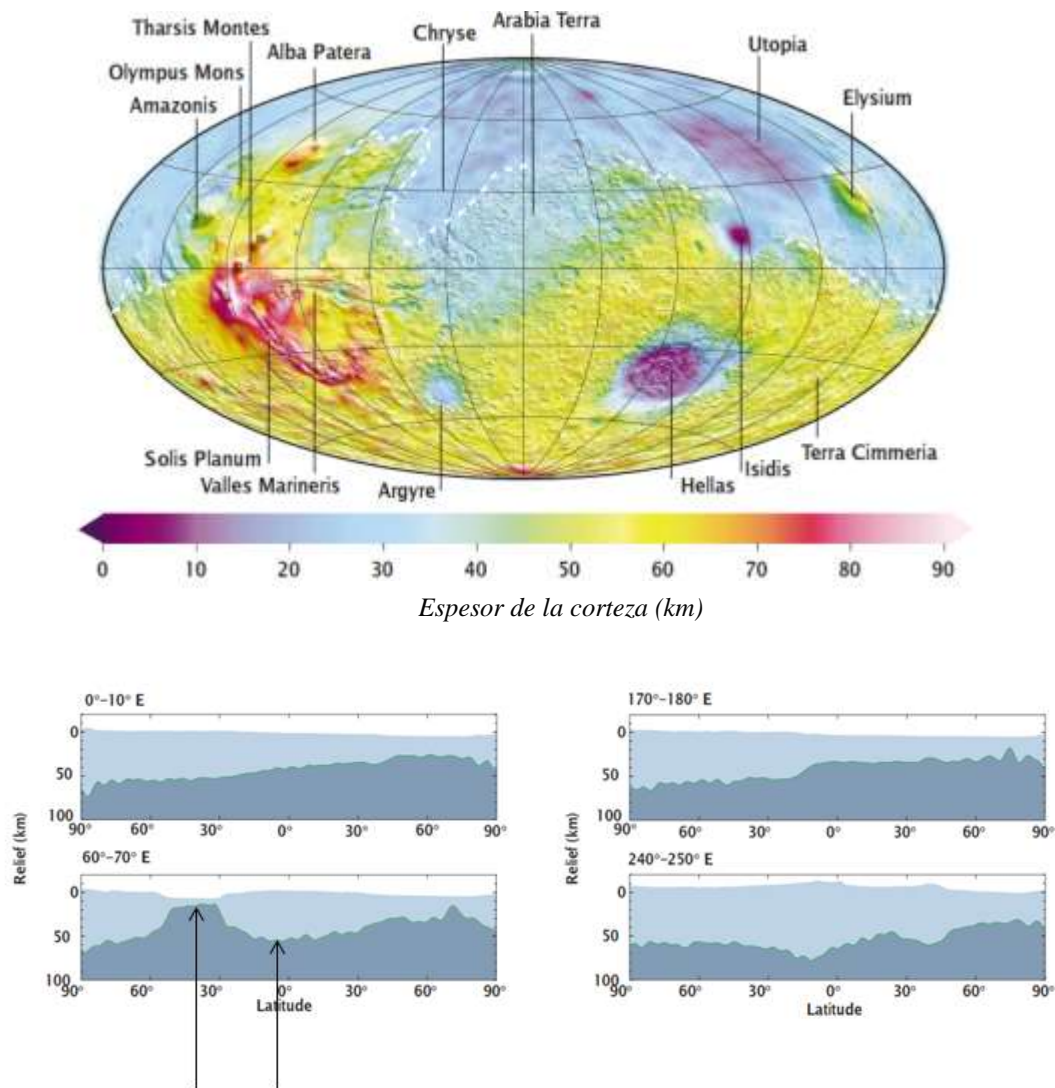
La información de la composición de la corteza de Marte ha sido obtenida por medio de espectroscopía de misiones como las *Viking (1975)* y *Pathfinder (1996)* y análisis geoquímicos de meteoritos caídos de Marte (Zuber, 2001).

Se ha interpretado que algunos meteoritos basálticos acondríticos encontrados en la Tierra como shergottitas, nakhilitas y chassignitas, han sido expulsados de la superficie marciana por uno o más impactos en los últimos 1-20 millones de años. La evidencia para determinar el origen marciano es la presencia de gases atrapados en ellos que coincide con la composición de la atmósfera marciana.

El meteorito Allan Hills 84001 (ALH84001) caído en la Antártida y descubierto en 1984, quizá sea el más famoso meteorito marciano con una edad de cristalización de 4.5 mil millones de años. Probablemente representa una muestra de la antigua corteza marciana.



Datos del Espectrómetro de Emisión Térmica Mars Global Surveyor (MGS) sugieren que las regiones oscuras de la superficie de Marte tienen dos composiciones: basalto en las Tierras Altas del Sur y andesita en las Tierras Bajas del Norte. El basalto en la Tierra se forma por fusión parcial del manto superior y la andesita en zonas de subducción, donde el agua ha sido un factor importante (Zuber, 2001).



*Se observa el adelgazamiento cortical debajo de la cuenca de Hellas y engrosamiento de la corteza debajo de Tharsis*

Figura 1.4 Espesor de la Corteza de Marte, se basa en la topografía y en la gravedad, Mars Global Surveyor. Tomada de Zuber (2001).

### *1.3.2 Manto marciano*

Un modelo del interior de Marte basado en la composición de meteoritos sugiere que el planeta se acrecionó a partir de dos componentes químicamente distintos. El primero era rico en volátiles y el segundo fue uno que consistía en minerales de alta temperatura. Estos componentes, al ser mezclados, proporcionaron el manto homogéneo (Zuber, 2001). Su espesor aproximado es de 2000 km.

Zuber (2001) sugiere un manto superior similar al de la Tierra que consiste principalmente en cristales de olivino ((Mg, Fe)<sub>2</sub> SiO<sub>4</sub>), piroxeno ((Ca,Mg,Fe,Mn,Na,Li)(Al, Mg, Fe, Mn,Cr,Sc,Ti)(Si, Al)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>) y granate ((Ca,Fe,Mg,Mn)<sub>3</sub>(Al, Fe, Mn,Cr,Ti,V)<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>). Con el aumento de la profundidad, la densidad y la temperatura aumentan y se tendría una estructura más empaquetada probablemente espinela (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). El manto inferior posiblemente tenga una composición de perovskita (CaTiO<sub>3</sub>).

Boyce (2002) propone que el manto, cerca del contacto con el núcleo, debe estar compuesto por minerales de alta densidad ricos en hierro como la majorita ((Mg<sub>3</sub>(Fe,Al,Si)<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) o la espinela (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). Según este autor, al no haber placas tectónicas en Marte ni reciclamiento de estas, no hay mezcla de componentes pesados y ligeros así el manto se encuentra enriquecido en elementos de alta densidad.

### *1.3.3 Núcleo marciano*

Meteoritos basálticos acondríticos como shergottitas, nakhilitas y chassignitas indican que el núcleo marciano debe estar compuesto principalmente de hierro y tiene un contenido entre el 5% y 15% de níquel y azufre con un espesor de 1000 km aproximadamente (Zuber, 2001). En cuanto a la existencia del dinamo, es probable que en un pasado lejano se haya generado por convección y resultó en la existencia de un campo magnético global.



Evidencia de esto es que una porción de corteza todavía está magnetizada, mientras que la mayor parte del campo magnético marciano ha desaparecido a través de los años. (Nimmo, et.al. 2005).

#### *1.4 Historia geológica de Marte*

La historia geológica de Marte suele dividirse en tres periodos. La clasificación más usada es la propuesta por Tanaka (1986) en base a la densidad superficial de cráteres. Un mayor número de cráteres indica que el terreno es más antiguo.

Los nombres de los periodos corresponde a las localidades Noachis Terra, Hesperia Planum y Amazonis Planitia que contienen rocas con edades diferentes y son usadas como superficies de referencia. Teniendo así las eras Noachiano, Hesperiano y Amazoniano. Estas eras se dividen en 8 épocas: Noachiano temprano, medio y tardío; Hesperiano temprano y tardío y Amazoniano temprano, medio y tardío. Algunos autores hablan de una época anterior al Noachiano llamada Pre-Noachiano (Tabla 1.2).

##### *1.4.1 Pre- Noachiano (hace 4.5-4.1 mil millones de años)*

Se extiende desde el momento de la formación del planeta y su corteza. Se caracteriza por un campo magnético planetario global y grandes impactos de meteoritos. Uno de ellos fue probablemente el responsable de la formación de la dicotomía global (Carr & Head, 2009).

### *1.4.2 Noachiano (hace 4.1-3.7 mil millones de años)*

El Noachiano se caracteriza por altas tasas de formación de cráteres, erosión y formación de valles. Es en éste período cuando ocurre la mayor parte del vulcanismo en la región de Tharsis.

Patrones de escorrentía superficial y lagos de cuencas abiertas, indican al menos precipitaciones episódicas y condiciones cálidas durante el Noachiano. En esta época, podrían haber estado presentes los océanos.

Clifford & Parker (2001) argumentan que a partir del inventario planetario de agua y las condiciones térmicas implícitas en las redes de valles, probablemente un tercio del planeta estaba cubierto por océanos.

### *1.4.3 Hesperiano (hace 3.7-2.9 mil millones de años)*

El Hesperiano se caracteriza por el vulcanismo que formó extensas llanuras de lava, formación de cañones, acumulación de depósitos de sulfato particularmente en el hemisferio occidental.

El Monte Olimpo, el volcán más alto del Sistema Solar, probablemente comenzó a acumularse en el Hesperiano. Dicho vulcanismo dio como resultado el repavimento del 30% del planeta.

En el Hesperiano tardío, el contenido de agua líquida en Marte equivaldría a la contenida en un océano con 0.5 y 1 km de profundidad. Posteriormente una gran parte de esta fue almacenada bajo la superficie como hielo y agua subterránea (Clifford et al. 2010).

#### *1.4.4 Amazoniano (hace 2.9 mil millones de años- presente)*

El Amazoniano abarca 2/3 partes de la historia del planeta. Procesos superficiales relacionados con el hielo y el viento durante el Amazoniano son más evidentes que en épocas anteriores.

Hay abundante evidencia de la acción del hielo (Carr & Head, 2009). La superficie es seca y árida. Alteración de los óxidos de hierro anhidros causó el color rojo del planeta (ESA exploration.esa.int 2015).

Tanaka et.al (2014) plantean que las rocas del Noachiano temprano, medio y tardío abarcan un 45% del total de la superficie marciana; las del Hesperiano temprano y tardío un 31% y las rocas del Amazoniano temprano, medio y tardío un 24% de la superficie.

#### *1.4.5 Clasificación según Bribing (2006)*

Bribing (2006) propone una clasificación diferente de acuerdo a la mineralogía marciana. Basándose en el instrumento OMEGA (espectrómetro de mapeo mineralógico en los rangos visible e infrarrojo) a bordo del Mars Express (MEX) que permitió identificar minerales por sus espectros, nombra así las eras: Phyllosiana, Theiikiana y Siderikiana.

La figura 1.5 muestra un esquema que compara las eras geológicas marcianas según Tanaka representado en gris (1986) y Bribing en color negro (2006).

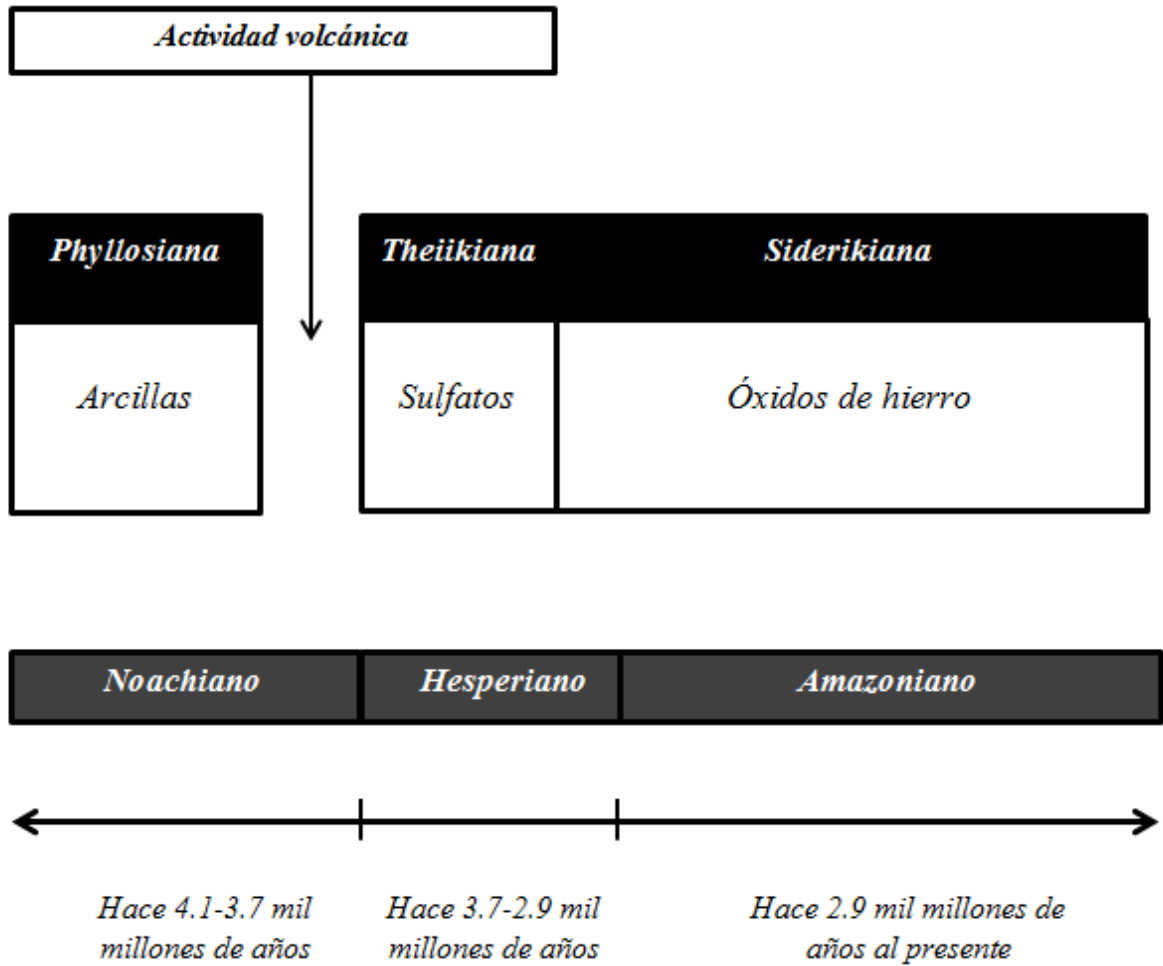


Figura 1.5 Eras geológicas de Marte. Se muestran las propuestas de Tanaka (1986) en color gris y Bribing (2006) en negro. Modificada de The Planetary Society Blog 2015. <http://www.planetary.org>

MARTE	TIEMPO (Ma)	TIERRA	
Origen	4600	Origen	
Bombardeo asteroidal: cuencas de impacto	NOACHIANO	Bombardeo asteroidal: formación de la Luna	
Atmósfera densa: ¿océanos?			
Captura de Phobos y Deimos			
Llanuras volcánicas			
Canales de esorrentía			
¿Origen de una biósfera?			
Pérdida progresiva de la atmósfera		4000	Origen de la vida
¿Tectónica de placas?		HESPERIANO	Rocas sedimentarias marinas: océanos
Crestas compresivas			¿Tectónica de placas no rígidas?
Superficie saturada de cráteres de impacto		AMAZONIANO	Apogeo de las algas unicelulares
Comienza la formación de Tharsis	Primeros organismos fotosintéticos		
¿Nueva atmósfera densa?	Litósfera rígida		
¿Atmósferas densas intermitentes que coexisten con océanos?	Gran producción de corteza continental		
Comienza la formación del domo de Elysium	Oxígeno libre en la atmósfera		
	Primeros organismos aerobios		
	Primera glaciación		
Intenso vulcanismo en Tharsis	PROTEROZOICO		Primer cráter de impacto conservado
Canales de desbordamiento			Primeras células con núcleo
¿Oceanus Borealis?			Comienza la mayor serie de glaciaciones
		Desarrollo explosivo de la biósfera	
		Primeros animales	
		Glaciación más intensa sucedida en la Tierra	
		(540) Primeros predadores	
		(500) Primeros vertebrados	
		(300) Primeras plantas con semillas	
		(260) Mayor extinción registrada	
	FANEROZOICO	(225) Animales de sangre caliente	
		(125) Plantas con flores	
Casquetes glaciares		(100) Grandes cantidades de petróleo	
	Hoy	(65) Extinción de dinosaurios, primeros primates	

Tabla1.2 Tabla comparativa entre los eventos entre Marte y la Tierra. Modificado de Anguita (1998).

## 2 Agua líquida en el pasado de Marte

Los paisajes marcianos indican una indudable actividad causada por el agua líquida y el hielo. Se han comparado imágenes de Marte y de la Tierra encontrando así accidentes geográficos marcianos con sorprendentes similitudes a las características que el agua líquida genera en nuestro planeta.

Fairén et al. (2003) sugirieron que el agua líquida moldeó el paisaje marciano y produjo los sistemas de canales que ahora pueden observarse en la superficie. También Parker & Currey (2001) reconocen la existencia de formas lacustres y marinas que están asociadas a lagos y océanos antiguos.

Baker (2006) marca evidencias geomorfológicas como canales y valles que disecan la superficie de Marte y discute la edad posible en que se originaron siendo edad Noachiana.

Aunque el debate sobre el "océano" de Marte ha recibido mucha atención, la evidencia apunta más hacia la existencia de numerosos lagos y mares, que estaban temporalmente sobre la superficie de Marte en varios momentos de la historia del planeta (Cabrol & Grin, 2002).

En un estudio de reciente publicación de Villanueva et al. (2015) exponen que Marte hace 4 mil millones de años habría tenido suficiente agua como para cubrir toda su superficie con una capa líquida de 140 metros de profundidad. Esta estimación se pudo hacer gracias a observaciones detalladas de dos formas ligeramente diferentes de agua en la atmósfera de Marte. Una es la forma más conocida del agua, compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno oxígeno, el H<sub>2</sub>O. La otra es el HDO, o agua semipesada, una variación natural en la que un átomo de hidrógeno es reemplazado por un isótopo más pesado, llamado deuterio. Como la forma deuterada es más pesada que el agua normal, resulta más difícil que se pierda en el espacio a través de la evaporación.

Así, cuanto mayor sea la pérdida de agua del planeta, mayor proporción de HDO habrá en el agua restante.

Los resultados obtenidos por Villanueva et al. (2015) sugieren que Marte debió haber perdido un volumen de agua 6,5 veces mayor del que actualmente se encuentra en los casquetes polares. El volumen del océano temprano de Marte debe haber sido, por lo menos, de 20 millones de kilómetros cúbicos. Entonces con Marte perdiendo tanta agua es posible que haya sido un planeta húmedo por más tiempo del que se pensaba.

Los científicos han logrado éstos datos gracias a las firmas químicas de los dos tipos de agua utilizando el VLT (Very Large Telescope) en Chile, junto con los instrumentos del Observatorio W. M. Keck y el Telescopio Infrarrojo de la NASA, en Hawaii. Fuente: <https://www.eso.org/public/spain/news/eso1509/> 2016.

### *2.1 Procesos fluviales*

Los ríos generan grandes cambios en el relieve. Éstos inciden sobre los canales por los que discurren, transportan material generado por la erosión y producen tanto formas erosivas como deposicionales.

Redes de valles en Marte diseccionan las Tierras Altas del Sur. Los cráteres de las tierras altas marcianas y cuencas de impacto fueron erosionados por procesos de escorrentía superficial. Abanicos aluviales son notablemente similares a los abanicos terrestres formados por procesos fluviales, probablemente se formaron durante un episodio de precipitación mayor que siguió a los primeros bombardeos.

### 2.1.1 Canales marcianos

En la Tierra, un canal es una parte de un valle fluvial por el cual ha circulado el agua. Lo que observamos en imágenes marcianas parecen ser marcas de canales antiguos por los que alguna vez circuló agua líquida. Anguita (1998) distingue tres tipos de canales marcianos (Tabla 2.1).

<i>Tipo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Forma</i>	<i>Singularidades</i>	<i>Asociaciones</i>
Escorrentía	Runoff	Sinuoso	Ramificaciones complejas	Agua líquida en superficie
Desbordamiento	Outflow	Compleja	Canales principales, morfologías interiores	Agua superficial o deshielo
Corroídos	Fretted	Anchos de fondo plano	Situados en latitudes altas	Deshielo-glaciarismo, aguas subterráneas

Tabla 2.1 Canales de Marte. Modificado de <http://www.academia.edu/> 2016.

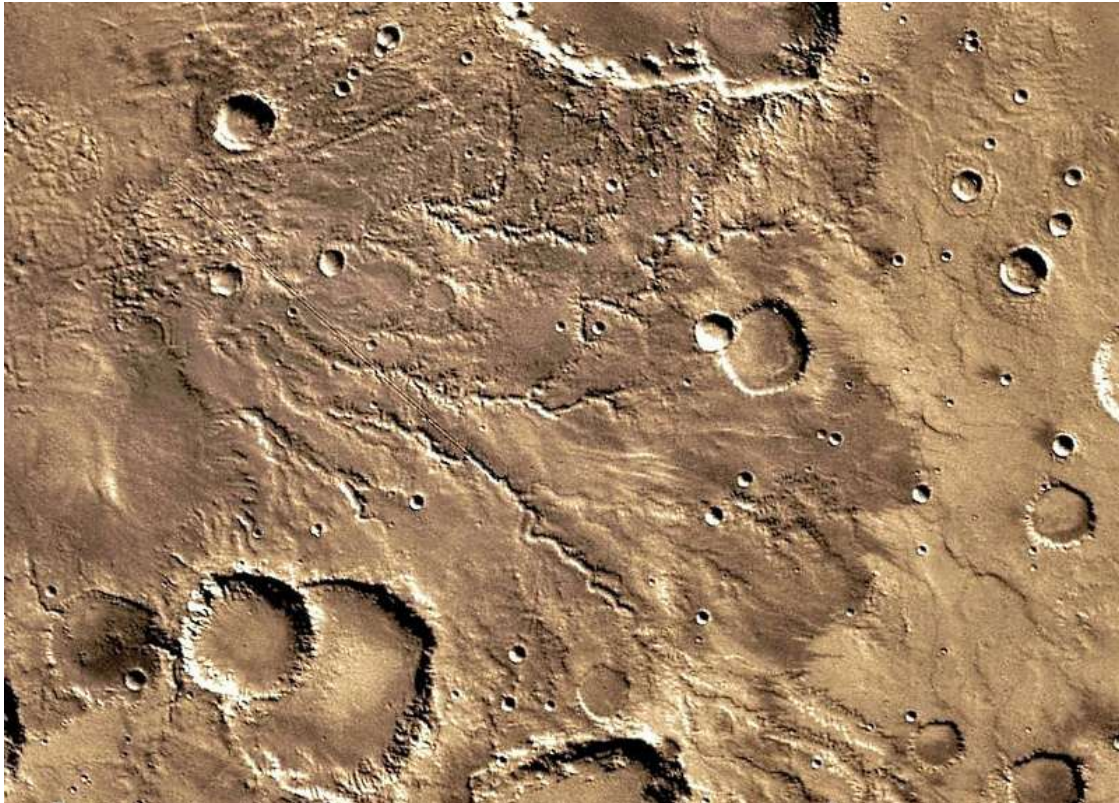
1. *Canales de escorrentía (Runoff)*: Son depresiones lineales que serpentean a través de los terrenos craterizados en zonas de mayor pendiente. Estos canales comienzan y acaban bruscamente, no hay evidencias de sedimentos en sus zonas terminales y algunos de ellos forman redes arborescentes.

Se cree que muchos canales de escorrentía no han sido excavados por agua superficial sino socavados por agua subterránea. El final brusco de muchos canales demuestra la acción del agua subterránea ya que parecen indicar infiltración.

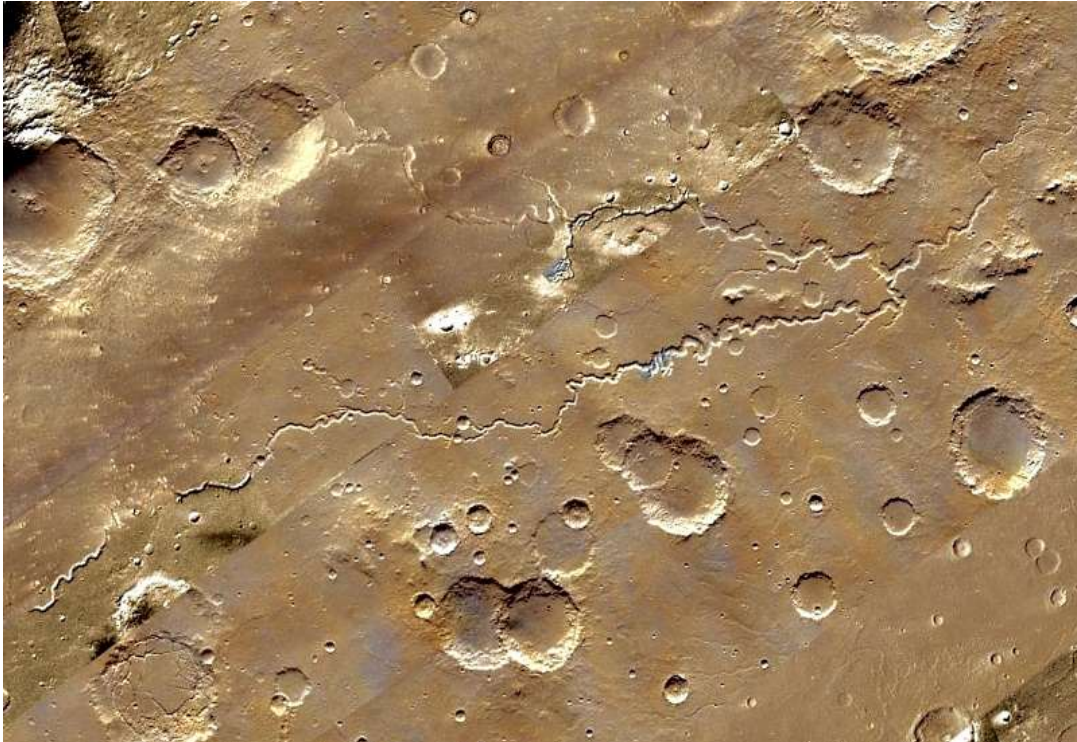
Hay indicios de que el agua, al menos en algunas ocasiones, circuló por la superficie, evidencia de ello son la existencia de algunas redes relativamente densas de canales (Figura 2.1) y algunos canales de escorrentía que tienen un cauce central bien marcado (Figura 2.2).



Los canales de escorrentía parecen ser contemporáneos con el terreno antiguo lleno de cráteres, lo que indica que se formaron poco después del final del intenso bombardeo (Baker 2006).



*Figura 2.1 Paraná Valles, red de canales de escorrentía en Noachis Terra, algunos canales están más marcados que otros por lo que parecen ser más recientes. NASA/USGS, ESA/DLR/FU Berlin (G.Neukum) Google Earth-Mars Option, 2016.*



*Figura 2.2 Canales de escorrentía en Nani Valles. NASA/USGS, ESA/DLR/FU Berlin (G.Neukum) Google Earth-Mars Option, 2016.*

2. *Canales de desbordamiento (Outflow)*: Son enormes valles que nacen ya totalmente desarrollados en terrenos caóticos (montañas aisladas de hasta 2000 metros de altura dispersas en estas extensas regiones). Algunos están relacionados con los cañones de Valles Marineris (Figura 2.3).

Los canales de desbordamiento son sinuosos de fondo plano y forman redes complejas que se bifurcan y vuelven a reunirse pero sin inundar las llanuras circundantes.

La mayor parte de los canales de desbordamiento se les atribuye una edad Hesperiana-Amazoniana (2.3-3.7 Ga). La edad es claramente menor que los canales de escorrentía pues es menor la edad del terreno por el cual se ha visto que circulan.



La hipótesis de la formación de los canales de desbordamiento sugiere que ocurrieron erupciones volcánicas bajo el hielo que lo fundieron provocando inundaciones. Para que esto haya podido ocurrir se requieren glaciares. Otra alternativa es la rotura por fallas o impactos de acuíferos a alta presión. El agua surgiría violentamente fragmentando la roca, y sin apenas tiempo para excavar un cauce, inundaría grandes zonas pendiente abajo.

Los canales de desbordamiento son frecuentes cerca de la cuenca de Chryse Acidalia, al oeste del complejo volcánico de Elysium en Elysium Planitia, en la parte este de la cuenca de Hellas y a lo largo del borde oeste y sur de Amazonis Planitia (Pereira et al. 2004).



*Figura 2.3 Ravi Vallis. Canal de desbordamiento debido probablemente a la fusión de hielo del permafrost. NASA/USGS, ESA/DLR/FU Berlin (G.Neukum) Google Earth-Mars Option, 2016.*

3. *Canales corroídos (Fretted)*: Forman valles muy anchos, de paredes verticales y fondo plano, recuerdan a los valles glaciares de la Tierra. Quizá se trate de canales de escorrentía agrandados precisamente por los deslizamientos (Figura 2.4).

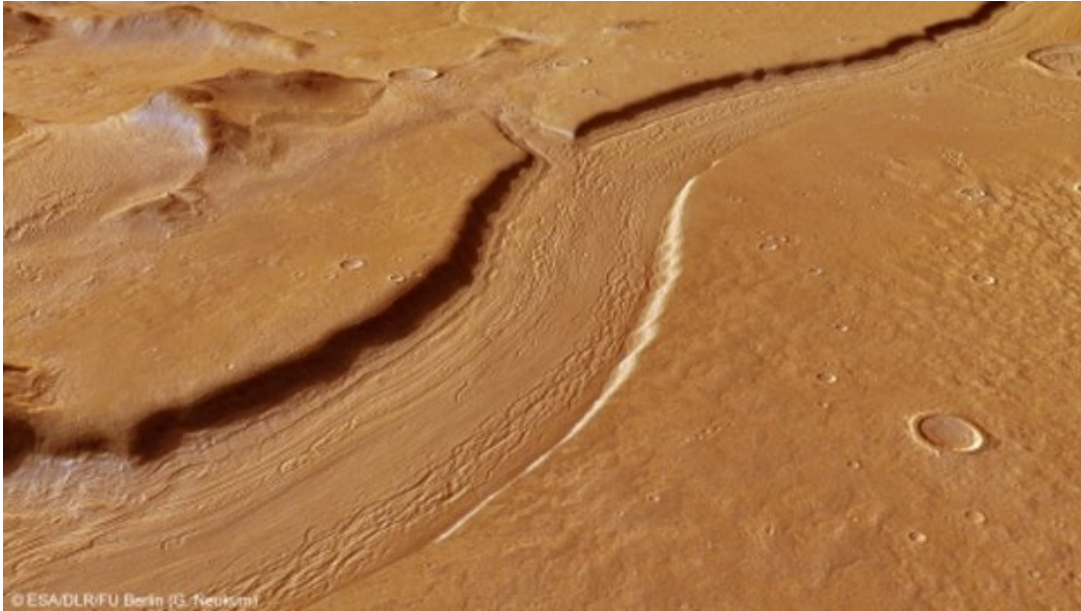


Figura 2.4 Reull Vallis. Canal corroído, quizá se trate de un canal de escorrentía agrandado. Crédito ESA [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Reull\\_Vallis\\_a\\_river\\_ran\\_through\\_it](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Reull_Vallis_a_river_ran_through_it). 2016

### 2.1.2 Abanicos aluviales

Un abanico aluvial es un cuerpo de depósitos fluviales cuya superficie se aproxima al segmento de un cono que se extiende radialmente ladera abajo desde el punto en el que el curso del agua abandona el área montañosa (Gutiérrez-Elorza, 2008). Se distinguen tres partes, zona proximal, media y distal (Figura 2.5)

Los abanicos aluviales que se han detectado en Marte (Figura 2.6) son notablemente similares a los abanicos terrestres formados por procesos fluviales. Probablemente se formaron durante un episodio de precipitación mayor que siguió a los primeros bombardeos.

Los abanicos aluviales presentes en la Tierra en la actualidad son preferentemente cuerpos de sedimentos muy gruesos a gruesos angulares con abundantes fragmentos de roca, careciendo de limos y arcillas.

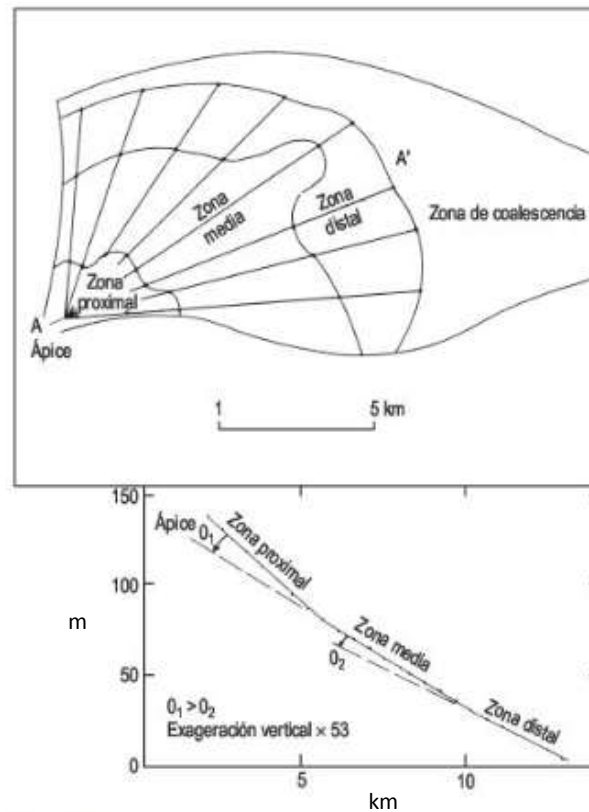
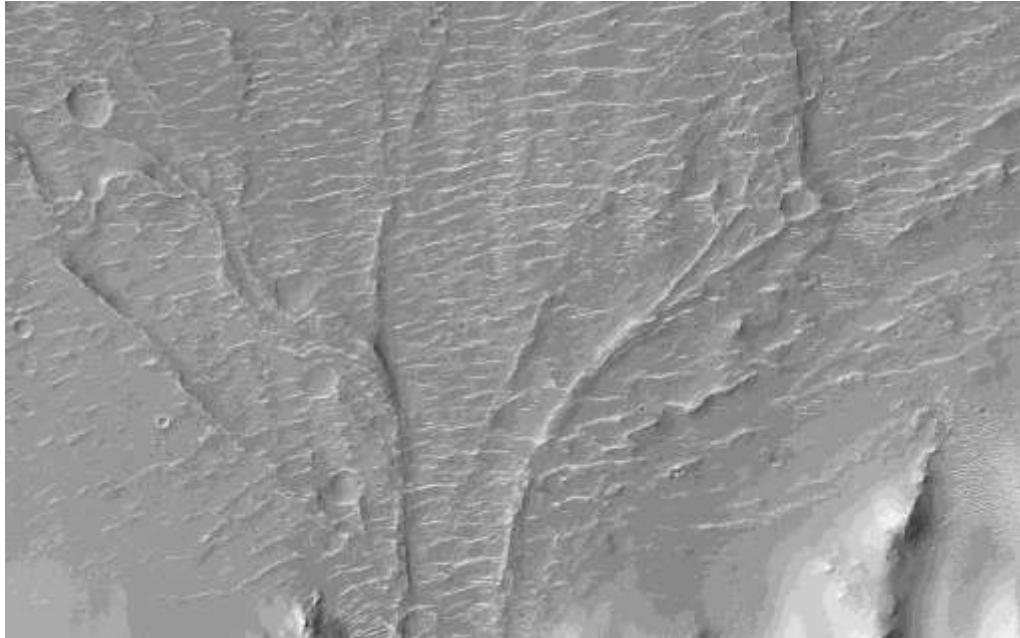


Figura 2.5 Perfil longitudinal y partes de un abanico aluvial, basado en el abanico Tumey Gulch en California. Tomado de Gutiérrez-Elorza, M., 2008.



*Figura 2.6 Abanico aluvial presente en un cráter marciano de baja latitud. JPL/NASA 2014.*

### *2.1.3 Deltas*

En la Tierra, un delta fluvial es definido como un territorio de forma triangular formado en la desembocadura de un río a través de los sedimentos que deposita la corriente. Posibles deltas fluviales en Marte son comúnmente asociados con los paleolagos. Los sedimentos de un delta son bastante variados, pudiendo estar formados por una mezcla de arcilla, limo y arena.

Los deltas marinos son algunas formas del relieve costero más típicos de la Tierra, presentan una gran diversidad de morfologías resultado de la combinación de varios factores. Su característica principal es que idealmente deben formarse a la misma altitud de todo el planeta (Di Achille & Hynes, 2010).

En el cráter Eberswalde (Figura 2.7) en Marte, se muestra morfologías similares a un delta que sólo se puede explicar por la actividad fluvial persistente en escalas de tiempo que van desde cientos de miles de años.



*Figura 2.7 Delta en el cráter Eberswalde en Marte. JPL/NASA. 2016.*

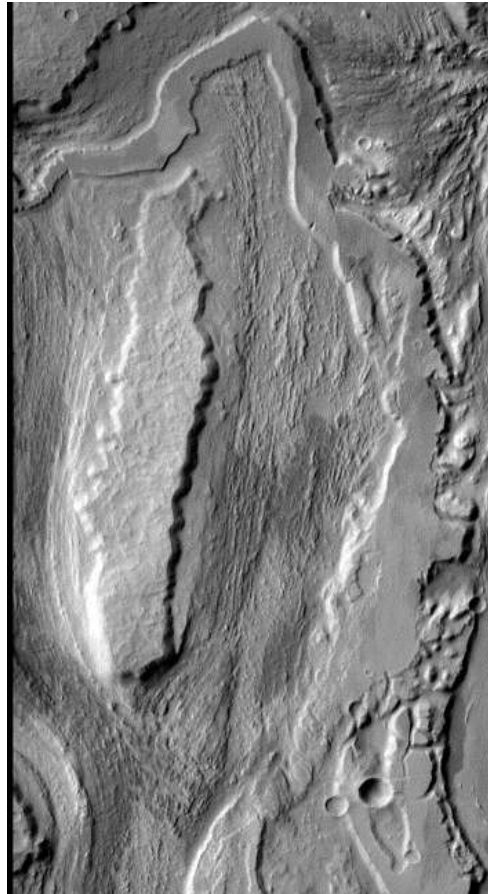
## *2.2 Morfologías invertidas*

La inversión de geformas, sobre todo canales, es el proceso mediante el cual se invierten las elevaciones topográficas, de manera que las características que antes tenían una elevación baja se vuelven altas (Figura 2.8).

Estas inversiones se producen a través de la erosión del material circundante que suele tener una menor dureza que el de relleno. Pueden estar involucrados una gran variedad de procesos, incluyendo relleno de depresiones por algún material resistente (como óxidos de hierro, sílice y sulfatos) y mecanismos de cementación secundaria, como mezcla de fluido durante el flujo de agua subterránea regional o el enfriamiento de fluidos hidrotermales.

En Marte han sido detectadas una gran variedad de formas invertidas (Pain et al. 2007), entre ellas están los antiguos canales que son quizás la característica más distintiva de inversión en Marte.





*Figura 2.8 Canal invertido en Mangala Valles. Obtenido de [http://serc.carleton.edu/download/images/18413/figure\\_3.jpg](http://serc.carleton.edu/download/images/18413/figure_3.jpg). 2016*

### *2.2.1 Eskers*

En la Tierra, un esker (Figura 2.9) es un depósito de los ríos que fluyen en los canales interiores de los glaciares. Estos depósitos tienen unos pocos metros de altura, de decenas a cientos de metros de anchura y varios kilómetros de largo, se componen fundamentalmente de arena y grava. Estas crestas depositadas por los ríos de aguas de fusión fluyen encima, dentro y por debajo de una masa de hielo glaciar estancado.



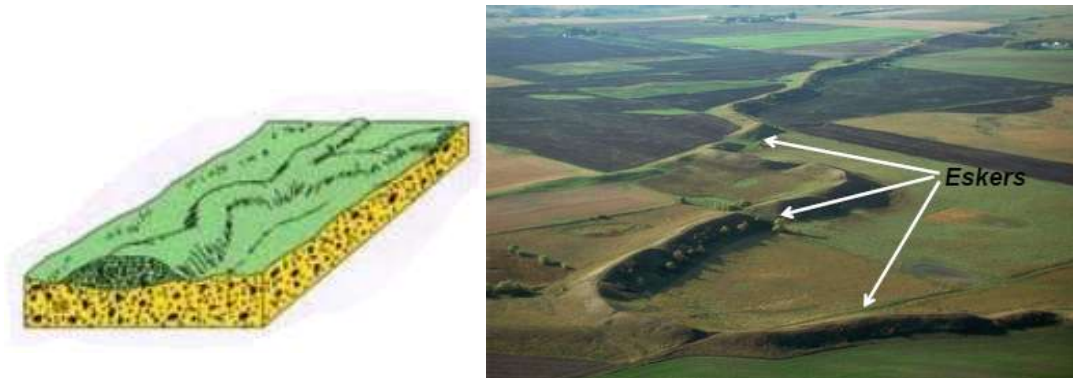


Figura 2.9 Esker glaciar en la Tierra. Tomado de Geomorfología <http://vishub.org/users/jose-vinas> 2016

Numerosas formas glaciares, entre ellas los eskers, se han identificado en las latitudes medias de Marte. Según Karlsson et al. (2015) los depósitos glaciares marcianos son lo suficientemente grandes como para cubrir la superficie del planeta en más de un metro de hielo, estos glaciares representan una parte importante de la reserva de agua en Marte, el hielo se encuentra protegido bajo una espesa capa de polvo.

Los eskers también tienen una elevación más alta que el terreno circundante, por lo cual los canales y formas invertidas en Marte pueden ser producto de la erosión del material circundante o se tratan de depósitos glaciares.

### 2.3 Duración del agua líquida en Marte

La atmósfera primitiva de Marte estaba compuesta de dióxido de carbono en cantidades suficientes para calentar la superficie por encima de cero grados centígrados (Tabla 1.1). La gruesa atmósfera podría haber sido mantenida por el reciclaje de dióxido de carbono debido a la mayor actividad y flujo de calor geotérmico. Esto sugiere que las temperaturas

por encima de la congelación se podrían haber mantenido en un límite óptimo. Diferentes mecanismos, como la nieve derretida pudieron haber desempeñado un papel importante en la creación del agua líquida necesaria para tallar las redes de valles

McKay & Davis (1990) han sugerido que los lagos cubiertos de hielo en el Marte primitivo podrían haber contenido agua líquida mucho después de que las temperaturas medias en la superficie eran bajo cero. La erosión fluvial observada en Marte solo se explica si hubo agua líquida suficiente como para cubrir completamente la superficie con un océano de aproximadamente 500 metros de profundidad.

En general las redes de valles se observan en el hemisferio sur, donde los terrenos son más antiguos, lo que indica que el agua líquida existió en las primeras etapas de Marte, cuando el clima era más cálido.

Según Di Achille & Hynek, (2010) el clima de Marte temprano pudo haber soportado un complejo sistema hidrológico y tal vez un océano que cubriera 1/3 de la superficie del planeta.

Recordando que a la mayor parte de los canales de desbordamiento se les atribuye una edad Hesperiana-Amazoniana (2.9-3.7 Ga) y que los canales de escorrentía existieron en los inicios de Marte durante el noachiano (4.1 Ga) entonces el agua estuvo presente durante un tiempo de 1.2 Ga. Es posible que el agua líquida estuviera temporalmente en la superficie marciana en varios momentos de su historia.

# 3 | ExoMars 2020

ExoMars es un proyecto desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) en colaboración con la Agencia Espacial Federal Rusa (ROSCOSMOS) cuyos objetivos principales son:

1. Búsqueda de signos de vida pasada y presente en Marte.
2. Investigación del agua y los ambientes geoquímicos.
3. Investigación de la relación agua/ medio ambiente geoquímico como una función de la profundidad.
4. Investigación de los gases traza atmosféricos marcianos y sus fuentes.
5. Caracterización de los ambientes superficiales.



ExoMars 2020 explorará la superficie marciana para hallar signos de vida, realizando estudios en la superficie y a profundidad. El objetivo es aterrizar un Rover (Figura 3.1) en un lugar con alto potencial para la búsqueda de material orgánico bien conservado y estudiar las propiedades físicas y químicas de las muestras marcianas recogidas en el subsuelo.

Es en el subsuelo donde podrían sobrevivir biomarcadores, no pueden existir en la superficie marciana debido a que serían destruidos por la radiación solar.

*Figura 3.1 Rover ExoMars. Crédito ESA, exploration.esa.int 2013.*

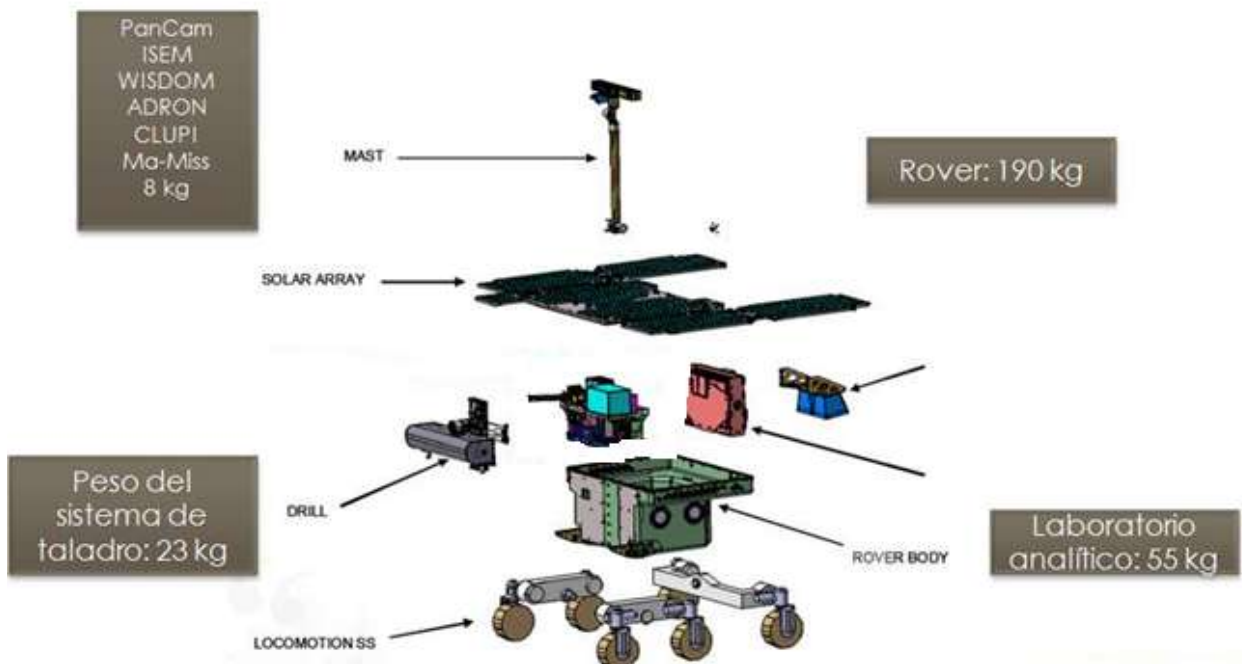


Figura 3.2 Partes del Rover ExoMars. ESA (Modificado de Baglioni, P. *Planetary Rover Workshop*, 2013).

El Rover ExoMars 2020 será el primer robot europeo que explore el planeta Marte. Aunque Rovers como el *Spirit* (2004), *Opportunity* (2004) y *Curiosity* (2012), enviados por la Agencia Espacial Estadounidense (NASA) han recorrido la superficie marciana, desde el punto de vista científico, los instrumentos que llevará ExoMars 2020 serán mucho más avanzados. El Rover ExoMars (Figura 3.2) será capaz de taladrar el suelo marciano hasta 2 metros de profundidad.

### 3.1 Instrumentos a bordo de la Misión ExoMars 2020

La información de cada instrumento ha sido obtenida de la página web: [exploration.esa.int](http://exploration.esa.int) en la sección *instruments* y se describen a continuación.

### 3.1.1 Cámara panorámica Pan-Cam

Pan- Cam está compuesta por dos cámaras para tomar fotografías panorámicas con un campo de visión fijo de  $37^\circ$ . Cada cámara está equipada con una rueda de 12 filtros para poder observar la superficie marciana en 12 longitudes de onda diferentes, lo que permite observaciones multiespectrales. Se tiene otra cámara de alta resolución a color con un campo de visión de  $5^\circ$ .

Los objetivos de la Pan- Cam son:

1. Verificar la posición del Rover, basándose en referencias geográficas locales.
2. Proporcionar un contexto geológico.
3. Capturar imágenes de alta resolución en lugares de difícil acceso.

Pan- Cam se complementa con un objetivo de calibración de 5 cm de diámetro y por un pequeño espejo esférico, el Rover Inspection Mirror (Figura 3.3), que permiten a la cámara capturar imágenes de objetos que no están directamente en el campo de visión. Estas imágenes también se pueden utilizar para comprobar el estado del Rover (ESA, [exploration.esa.int](http://exploration.esa.int), 2015).

Los 12 filtros de la Pan-Cam están centrados en las longitudes de onda 440-1000 nm. La figura 3.4 muestra los perfiles de transmisión para los filtros propuestos para el instrumento Pan-Cam así como los símbolos y la reflectancia de diferentes minerales.

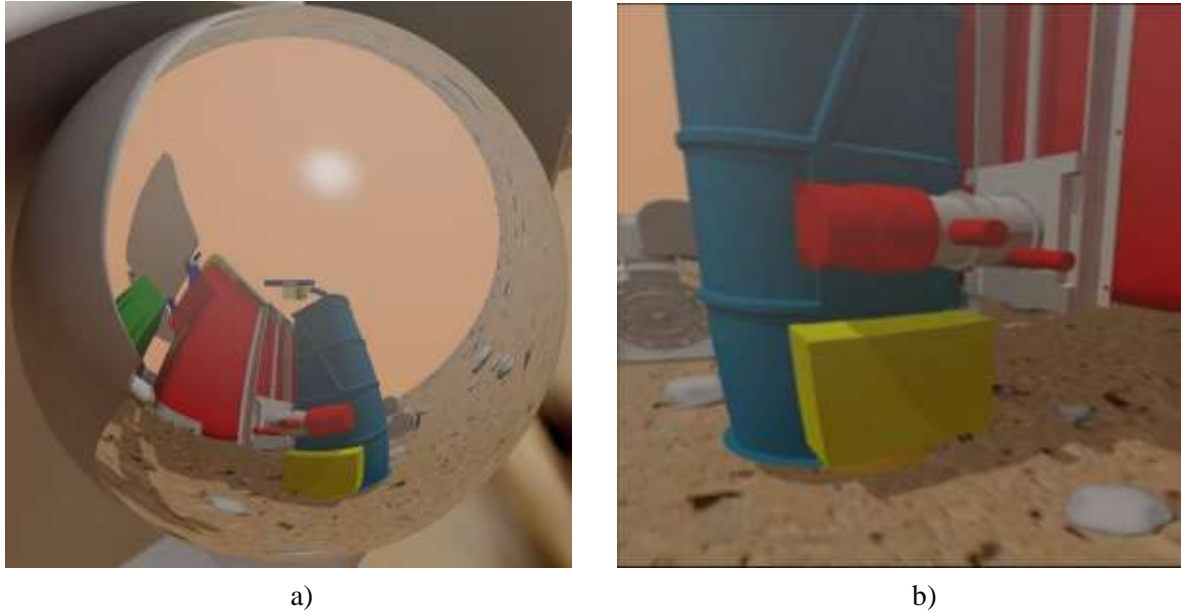


Figura 3.3 a) Rover Inspection Mirror b) Imagen plana del Rover Inspection Mirror después del procesamiento. Crédito ESA. [exploration.esa.int](http://exploration.esa.int), Rover instruments, 2015.

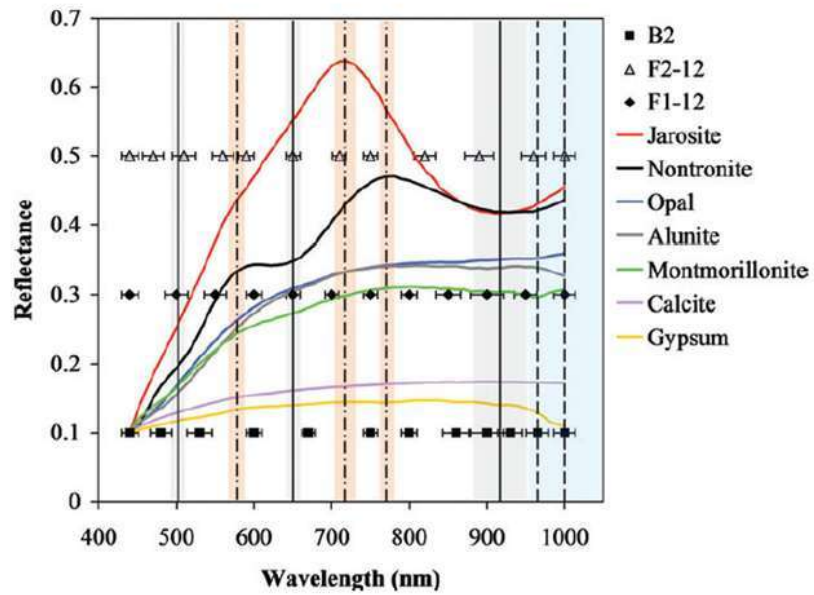


Figura 3.4 Perfiles de transmisión para los filtros propuestos para la Pan-Cam, se grafica reflectancia de diferentes minerales contra longitud de onda (Cousins et al. 2012).

### 3.1.2 Espectrómetro Infrarrojo ExoMars ISEM

ISEM es un espectrómetro infrarrojo montado en el mástil del Rover, diseñado para determinar la composición mineral importante de rocas distantes, afloramientos inaccesibles o suelos. Entre sus objetivos principales se encuentran: búsqueda y estudio de los minerales hidratados (OH, H<sub>2</sub>O), identificación y cartografía de la distribución de los productos de alteración acuosos en el sitio de aterrizaje; estudio de las variaciones de las propiedades del polvo atmosférico y la composición gaseosa de la atmósfera.

El instrumento tiene una masa de 1.3 kg, se compone de dos bloques, la caja óptica montada en el mástil del Rover y la caja electrónica localizada en el interior del compartimento termo-estabilizador del Rover (Figura 3.5).

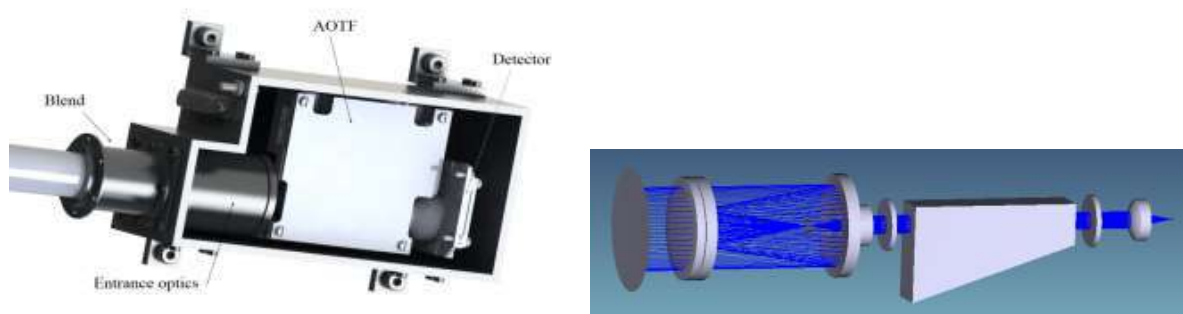


Figura 3.5. ISEM, modelo 3D y esquema óptico, ESA, [exploration.esa.int](http://exploration.esa.int) 2015.

### 3.1.3 Close Up Imager CLUPI

CLUPI tomará imágenes de rocas y material no consolidado del tamaño de milímetros a escala de centímetro. Buscará biofirmas y rasgos morfológicos sobre los afloramientos.

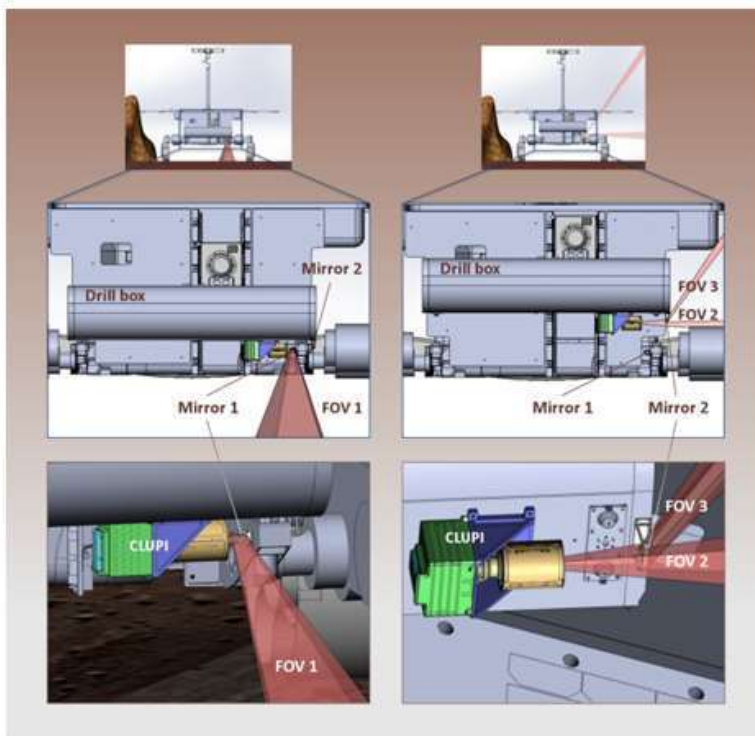
Será un generador de imágenes con la capacidad de obtenerlas a una distancia de 10 cm del objeto. La resolución de las imágenes será de  $7\mu\text{m}/\text{pixel}$ .

CLUPI se encuentra en la caja del taladro del Rover. Se inclina y se levanta para obtener variados modos de visualización. El uso de dos espejos fijos - uno plano y otro cóncavo - proporcionará tres campos de visión llamados FOV (Figura 3.6)

FOV 1: Observará el área inmediatamente delante del Rover para caracterizar las propiedades físicas de las rocas, tales como textura, estructura y morfología.

FOV 2: Se usará para identificar la información relacionada con el agua. Variaciones de color y de estratificación ayudarán a determinar la historia geológica.

FOV 3: Se usará para la operación de perforación, monitorear el color y las variaciones de textura que infieren si el taladro se ha encontrado con un tipo diferente de material o depósito. También se puede utilizar para obtener información sobre las propiedades mecánicas del suelo, tales como el tamaño de grano, la forma y la cohesión.



*Figura 3.6 CLUPI en donde se muestran los tres campos de visión. ESA. exploration.esa.int 2015.*



CLUPI será capaz de observar el pozo de sondeo hasta una profundidad de aproximadamente 10 cm, dependiendo de las condiciones de iluminación locales.

### *3.1.4 Water Ice and Subsurface Deposit Observation on Mars WISDOM*

El instrumento WISDOM puede transmitir y recibir señales utilizando dos pequeñas antenas montadas (Figura 3.7) en la parte posterior del Rover. Estudiará la naturaleza del subsuelo de forma remota, utilizando impulsos de un radar de penetración terrestre UHF (frecuencia ultra alta), que cubre la gama de frecuencias de 500 MHz a 3 GHz, para mapear las capas subterráneas.

También proporcionará el contexto geológico tridimensional del terreno cubierto por el Rover, hará mediciones de alta resolución, con una resolución vertical de unos pocos centímetros, hasta una profundidad de 3 metros, complementando los dos metros de alcance de perforación del Rover.

WISDOM caracterizará las propiedades electromagnéticas de suelo marciano con el fin de trazar la escala de la diversidad en el subsuelo poco profundo.



*Figura 3.7 Unidad electrónica y antenas, WISDOM ExoMars. ESA. [exploration.esa.int](http://exploration.esa.int) 2015.*

### 3.1.5 Mars Multispectral Imager for Subsurface Studies Ma-MISS

Ma-MISS está situado en el interior del taladro del ExoMars Rover, dará señales multiespectrales para estudios subterráneos, será el instrumento en contacto más cercano con el subsuelo marciano. Obtendrá las imágenes de las paredes del pozo creado por el taladro para estudiar la mineralogía de Marte y la formación rocosa.

Ma-MISS se iluminará en la pared cilíndrica del agujero a través de una ventana transparente situada en la herramienta de perforación (Figura 3.8). Se capturará la luz reflejada, se analizará su espectro y transferirá los datos sobre la estratigrafía del agujero al ordenador del Rover para su posterior análisis.

La rotación del instrumento a medida que desciende permitirá que las imágenes se construyan en horizontal y vertical: (imagen Anillo) horizontal y secuencias verticales (imagen de columna).



*Figura 3.8 Las pruebas Ma-MISS con material como toba se han llevado a cabo para evaluar y caracterizar el desempeño del sistema. Las pruebas han demostrado que el instrumento es capaz de adquirir señales precisas reflejadas a partir de minerales representativos, tales como olivino y yeso. Créditos ESA, exploration.esa.int 2015.*

### 3.1.6 *MicrOmega*

MicrOmega (Figura 3.9) es un espectrómetro infrarrojo cuyos objetivos son identificar la mineralogía y la composición molecular de las muestras marcianas recogidas por el taladro ExoMars. Caracterizará las muestras recogidas, específicamente las sustancias orgánicas que pueden contener. Consiste en un microscopio de luz visible y un espectrómetro de imágenes de infrarrojo.

El instrumento adquiere imágenes monocromáticas con una alta resolución de  $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$  por píxel en unas pocas longitudes de onda entre  $0,5\ \mu\text{m}$  y  $0,9\ \mu\text{m}$  y con un muestreo espectral continuo y alto de  $0,9\ \mu\text{m}$  a  $3,5\ \mu\text{m}$ . Cada píxel MicrOmega adquiere todo el espectro en un dominio espectral, lo que le permite identificar la composición de las muestras a escala de grano.



*Figura 3.9 Espectrómetro MicrOmega. Créditos ESA, exploration.esa.int, 2015.*

### *3.1.7 Espectrómetro Raman*

Raman recogerá y analizará la luz emitida por un láser en una muestra. La información espectral recibida por el espectrómetro (número de picos, la posición y las intensidades relativas) se determina por la estructura molecular y la composición de un compuesto, lo que permite la identificación y caracterización de las moléculas de minerales y rocas marcianas. Este método permite el análisis de la muestra de una manera no destructiva, lo que significa que la muestra permanece intacta para su posterior análisis por otros instrumentos.

El instrumento Raman consta de tres unidades principales, la cabeza óptica, la unidad del espectrómetro y la unidad electrónica, que están interconectadas por un arnés óptico y eléctrico. Raman pesa poco más de 2 kg en total, incluyendo todos los arneses de interconexión necesarios, y consume tan poco como ~30W de energía eléctrica durante el funcionamiento.

### *3.1.8 Mars Organic Molecule Analyser MOMA*

Entre los objetivos de MOMA se encuentra la detección de moléculas orgánicas, incluso a concentraciones muy bajas, y la posibilidad de establecer su biótica o el origen abiótico mediante la identificación molecular, así como también analizará los gases de la atmósfera marciana.

MOMA tiene dos modos de funcionamiento complementarios (Figura 3.10): un cromatógrafo de gases con espectrometría de masas (GC-MS MOMA) y un láser-espectrometría de masas (MOMA LD-MS). El modo de GC-MS se utiliza para identificar y analizar moléculas volátiles que se encuentran en las muestras de suelo de Marte.

El material de muestra en polvo proporcionado por el taladro del Rover se utilizará para llenar uno de los veinte pequeños hornos de una sola vez. A alta temperatura, todos los materiales volátiles se evaporan y se extraen para ser transferidos al cromatógrafo de gas, donde serán separados e identificados.

Las moléculas volátiles separadas serán ionizadas y luego se analizarán individualmente con el espectrómetro de masas.

En el modo LD-MS, el material de la muestra en polvo se coloca cuidadosamente debajo de un cabezal láser de alta potencia. Los iones son guiados en el espectrómetro de masas en el que se analizan. Este modo se utiliza para estudiar moléculas menos volátiles y materiales resistentes al calor.

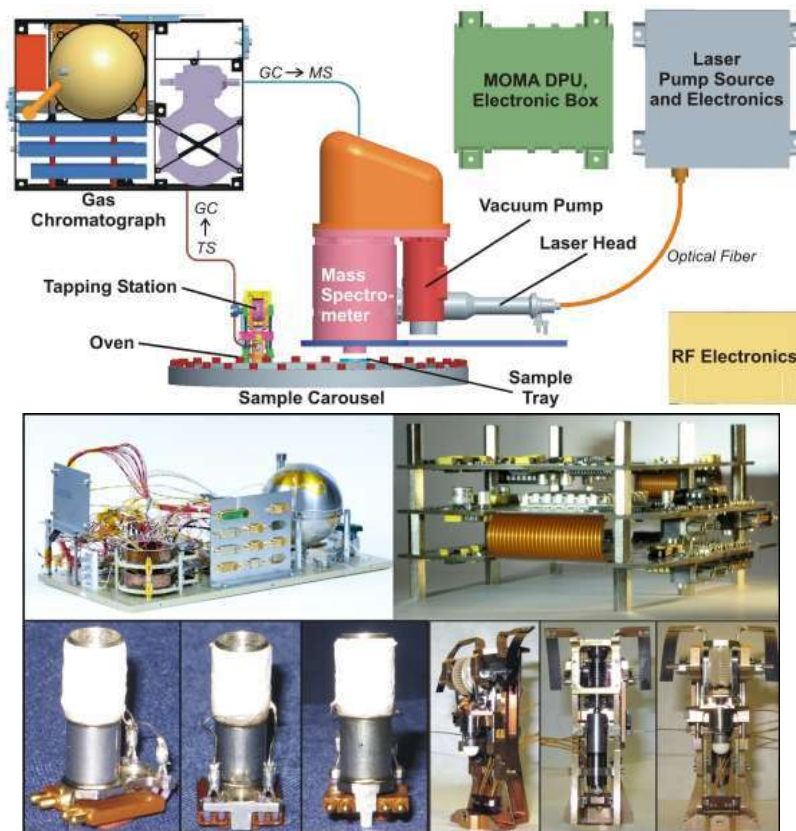


Figura 3.10. a) MOMA, se muestran los dos modos de funcionamiento cromatógrafo de gases espectrometría de masas (GC-MS MOMA) y un láser-espectrometría de masas (MOMA LD-MS). b) Partes del MOMA. Créditos ESA, exploration.esa.int 2015



### 3.2 Sitios de aterrizaje para la Misión ExoMars 2020

A finales de 2013 comenzó la búsqueda de un lugar apropiado para el aterrizaje de la Misión ExoMars 2020, solicitando propuestas a la comunidad científica. El primer *Landing Site Selection Workshop* se llevó a cabo en marzo de 2014 en the European Space Astronomy Centre (ESAC) en España.

El grupo de trabajo para la selección del lugar de aterrizaje evaluó 8 propuestas iniciales de sitios marcianos. Al final del encuentro se identificaron las cuatro mejores opciones: Mawrth Vallis, Aram Dorsum, Oxia Planum e Hypanis Vallis (Figura 3.11)

En el lugar de aterrizaje deben abundar las rocas primitivas y evidencia de gran cantidad de agua líquida en el pasado, deben existir formaciones rocosas expuestas y poco polvo superficial. Las evidencias morfológicas y los minerales expuestos dentro de los sitios propuestos deben hallarse dentro de las elipses de aterrizaje propuestas por el equipo de científicos de la Misión ExoMars, con unas dimensiones de 104 km por 19 km.

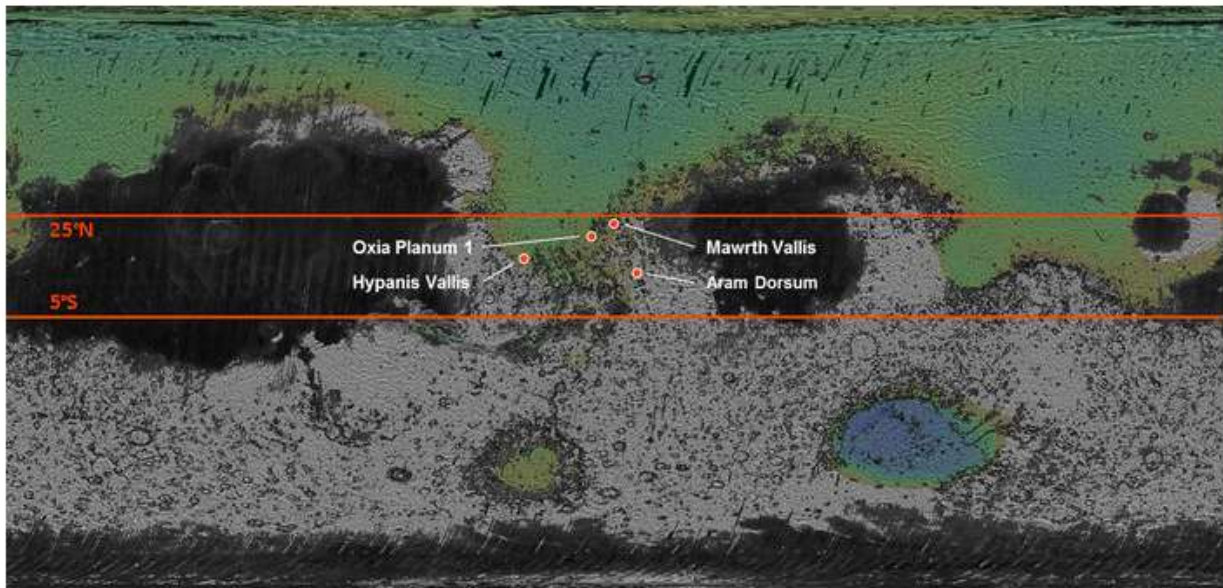


Figura 3.11 Sitios de aterrizaje propuestos para ExoMars 2018. Crédito ESA, [www.exploration.esa.int](http://www.exploration.esa.int) 2014.

A continuación se describen las tres regiones que no fueron escogidas como sitios de aterrizaje: Mawrth Vallis, Hypanis Vallis y Aram Dorsum.

### *3.2.1 Mawrth Vallis*

La región Mawrth Vallis se localiza en el contacto entre las Tierras Altas de Arabia Terra y Chryse Planitia, con una elevación MOLA entre -1.0 y -4.0 km. Se propusieron dos elipses similares ubicadas en 22.16°N, 342.05°E y 22.25°N, 342.00°E.

El origen de los depósitos que dieron lugar a Mawrth Vallis es desconocido, pero es uno de los canales más antiguos de Marte (The ExoMars 2018 Landing Site Selection Working Group. 2014).

Afloramientos en tonos claros en la superficie de Mawrth Vallis muestran la presencia de filosilicatos en un área de 300 por 300 km. En el fondo del canal también hay presencia de estos minerales arcillosos, lo que se ha explicado como procesos fluviales que erosionaron cada lado del canal y depositaron dicho material en el suelo.

Una capa oscura de aproximadamente 10 m de espesor posiblemente de origen volcánico es visible en la zona. Su edad es menor que la de los filosilicatos, probablemente cubrió toda la región pero ahora ha sido erosionada.

En cuanto a la mineralogía hay presencia de sedimentos ricos en arcilla. En la parte inferior las arcillas son ricas en hierro y en la parte superior ricas en aluminio. Se observó un material ferroso no identificado en el contacto entre los dos tipos de arcillas que seguramente es un horizonte de reacción entre las diferentes condiciones redox (The ExoMars 2018 Landing Site Selection Working Group. 2014).

La edad de Mawrth Vallis se estima de 4 mil millones de años, todas las rocas expuestas son del Noachiano. Mawrth Vallis es compatible con los objetivos científicos de la Misión ExoMars 2020. Posee indicadores mineralógicos claros que indican largos periodos de interacción con el agua líquida que apuntan a la posibilidad de ambientes habitables en donde la vida marciana pudo haber existido o existe.

### 3.2.2 *Hypanis Vallis*

Localizado en la región de Xanthe Terra en las coordenadas 11.9°N, 314.0°E, Hypanis Vallis es uno de varios valles situados entre dos grandes canales de flujo. Varios de estos valles presentan depósitos en forma de abanico en sus extremos (The ExoMars 2018 Landing Site Selection Working Group. 2014).

La falta de rocas al pie de los escarpes indica que los depósitos estratificados son constituidos por material de grano fino. Hay señales débiles de filosilicatos cerca de la región.

Hay una clara evidencia de que las rocas de Hypanis Vallis son de edad Noachiano. En el lugar de aterrizaje propuesto se encuentra la transición de Noachiano medio a tardío.

Los sedimentos proximales de Hypanis Vallis son estratificados y de grano grueso, lo que no es compatible con la preservación de alguna biofirma. Sin embargo los depósitos más distales de grano fino proporcionan un mejor sitio para la conservación de biofirmas.

El problema con este sitio sugerido es que no se han detectado muchos filosilicatos, también hay incertidumbre de la naturaleza de los sedimentos proximales y distales, siendo los primeros de grano grueso, sin biomarcadores, que no cumplen con los objetivos de la misión.

### 3.2.3 *Aram Dorsum*

Aram Dorsum se localiza en terrenos del Noachiano Medio en las coordenadas 7.9°N, 348.8°E, con una gran concentración de canales invertidos. Es ampliamente compatible con los objetivos de ExoMars 2020, sin embargo, la elevación e inclinación del terreno podrían ser un obstáculo (The ExoMars 2018 Landing Site Selection Working Group. 2014).



Hay evidencia geomorfológica de sedimentos fluviales y lacustres. Estos sedimentos estuvieron enterrados la mayor parte de la historia geológica de Marte y recientemente fueron exhumados, lo cual es muy favorable para la preservación de vida en Aram Dorsum. La firma de filosilicatos en la región es muy débil, una cantidad de polvo, aunque sea mínima, puede obstaculizar la detección.

### *3.3 Elección del sitio final de aterrizaje*

Del 20 al 22 de octubre de 2015 se llevó a cabo el *Third Landing Site Selection Workshop* en el European Space Research and Technology Centre (ESTEC) en los Países Bajos, al cual tuve la oportunidad de asistir. El objetivo de la reunión fue elegir a los dos sitios finalistas de los cuales uno se convirtió en el sitio principal.

Los puntos evaluados fueron: la seguridad para aterrizar, historia y geología del sitio y la posibilidad de hallar algunas biofirmas.

El primer día del Workshop se expusieron las características a detalle de los cuatro sitios propuestos. Se trataron las limitaciones de ingeniería con el mayor detalle posible. En el segundo día se recapitulaban las conclusiones y se procedió a la votación. Se llenó un cuadro comparativo que hizo más fácil el proceso de elegir un sitio, se presenta a continuación.

<i>Propiedad</i>	<i>Mawrth Vallis</i>	<i>Oxia Planum</i>	<i>Hypanis Vallis</i>	<i>Aram Dorsum</i>
<i>Edad</i>	<i>4.0 – 3.8 mil millones de años</i>	<i>Más antiguo que 3.8 mil millones de años</i>	<i>3.6-3.5 mil millones de años</i>	<i>4.0 mil millones de años?</i>
<i>Duración de eventos acuosos</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>
<i>Preservación de biofirmas, tamaño de grano fino</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Si, más gruesos en el delta</i>	<i>Si en las llanuras de inundación, más grueso en el río</i>
<i>Preservación de biofirmas, entierro rápido</i>	<i>Probable</i>	<i>Probable</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>
<i>Preservación de biofirmas, exhumación reciente</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Poco claro</i>	<i>Si</i>
<i>Cobertura de dunas</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>
<i>Cobertura de polvo</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>
<i>Cobertura de rocas</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>
<i>Inclinaciones</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>
<i>Protección planetaria</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>	<i>Si</i>

*Tabla 3.1 Comparación entre las propiedades de cada sitio de aterrizaje propuesto. Modificado de Vago. J. 2015 Presentación de Introducción Third Landing Site Selection Workshop.*

Al final del segundo día, después de la votación, se dio a conocer el sitio de aterrizaje, el elegido fue Oxia Planum. Con una diferencia mínima en segundo lugar quedó Mawrth Vallis.

Las razones importantes por las que se eligió Oxia Planum se debió a que es una zona llana, lo cual hace que el Rover no corra peligro alguno y tiene evidencias de que el agua estuvo presente en dicha región, por lo que es muy posible encontrar evidencias de vida presente y pasada.

# 4 | Oxia Planum

## 4.1 División de la superficie de Marte

La superficie de Marte está dividida en 30 cuadriláteros utilizados por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Cada uno se nombra en base a sus fronteras a lo largo de las líneas de latitud y longitud (Figura 4.1). El mapa fue creado por imágenes adquiridas por la Mars Orbiter Camera en 1999. En la versión inicial se completaron todos los cuadriláteros con excepción de las regiones polares. La cobertura del Polo Sur se completó en 2002 (Malin Space Science Systems <http://www.msss.com/> 2010).

Hay 8 cuadriláteros que cubren cada uno 45° de longitud y entre 0° y 30° de latitud; seis cuadriláteros que cubren cada uno 60° de longitud y entre 30° y 65° de latitud; y un cuadrilátero que cubre las latitudes por encima de 65°. Los cuadriláteros se nombran a partir de las notables formaciones geológicas.

A continuación se presenta una tabla con cada uno de los cuadriláteros en los que se divide Marte y se describen las latitudes y longitudes que abarca. Posteriormente se relacionan con el mapa de la Figura 4.1

Número	Clave	Nombre	Latitud	Longitud	
1	MC-01	Mare Boreum	65° a 90°N	0° a 360°	
2	MC-02	Diacria	30° a 65°N	180° a 240°E	120° a 180°W
3	MC-03	Arcadia	30° a 65°N	240° a 300°E	60° a 120°W
4	MC-04	Mare Acidalium	30° a 65°N	300° a 360°E	0° a 60°W
5	MC-05	Ismenius Lacus	30° a 65°N	0° a 60°E	300° a 360°W
6	MC-06	Casius	30° a 65°N	60° a 120°E	240° a 300°W

7	MC-07	Cebrenia	30° a 65°N	120° a 180°E	180° a 240°W
8	MC-08	Amazonis	0° a 30°N	180° a 225°E	135° a 180°W
9	MC-09	Tharsis	0° a 30°N	225° a 270°E	90° a 135°W
10	MC-10	Lunae Palus	0° a 30°N	270° a 315°E	45° a 90°W
11	MC-11	Oxia Palus	0° a 30°N	315° a 360°E	0° a 45°W
12	MC-12	Arabia	0° a 30°N	0° a 45°E	315° a 360°W
13	MC-13	Syrtis Major	0° a 30°N	45° a 90°E	270° a 315°W
14	MC-14	Amenthes	0° a 30°N	90° a 135°E	225° a 270°W
15	MC-15	Elysium	0° a 30°N	135° a 180°E	180° a 225°W
16	MC-16	Memnonia	-30° a 0°S	180° a 225°E	135° a 180°W
17	MC-17	Phoenicis Lacus	-30° a 0°S	225° a 270°E	90° a 135°W
18	MC-18	Coprates	-30° a 0°S	270° a 315°E	45° a 90°W
19	MC-19	Margaritifer Sinus	-30° a 0°S	315° a 360°E	0° a 45°W
20	MC-20	Sinus Sabaeus	-30° a 0°S	0° a 45°E	315° a 360°W
21	MC-21	Iapygia	-30° a 0°S	45° a 90°E	270° a 315°W
22	MC-22	Mare Tyrrhenum	-30° a 0°S	90° a 135°E	225° a 270°W
23	MC-23	Aeolis	-30° a 0°S	135° a 180°E	180° a 225°W
24	MC-24	Phaethontis	-65° a -30°S	180° a 240°W	120° a 180°W
25	MC-25	Thaumasia	-65° a -30°S	240° a 300°E	60° a 120°W
26	MC-26	Argyre	-65° a -30°S	300° a 360°E	0° a 60°W
27	MC-27	Noachis	-65° a -30°S	0° a 60°E	300° a 360°W
28	MC-28	Hellas	-65° a -30°S	60° a 120°E	240° a 300°W
29	MC-29	Eridania	-65° a -30°S	120° a 180°E	180° a 240°W
30	MC-30	Mare Australe	-90° a -65°S	0° a 360°	

Tabla 4.1 Cuadriláteros de Marte. El cuadrilátero MC-11 corresponde a la zona en la que se encuentra Oxia Planum. Modificado de Malin Space Science Systems [www.msss.com/mgchw/mgm/](http://www.msss.com/mgchw/mgm/) 2010.

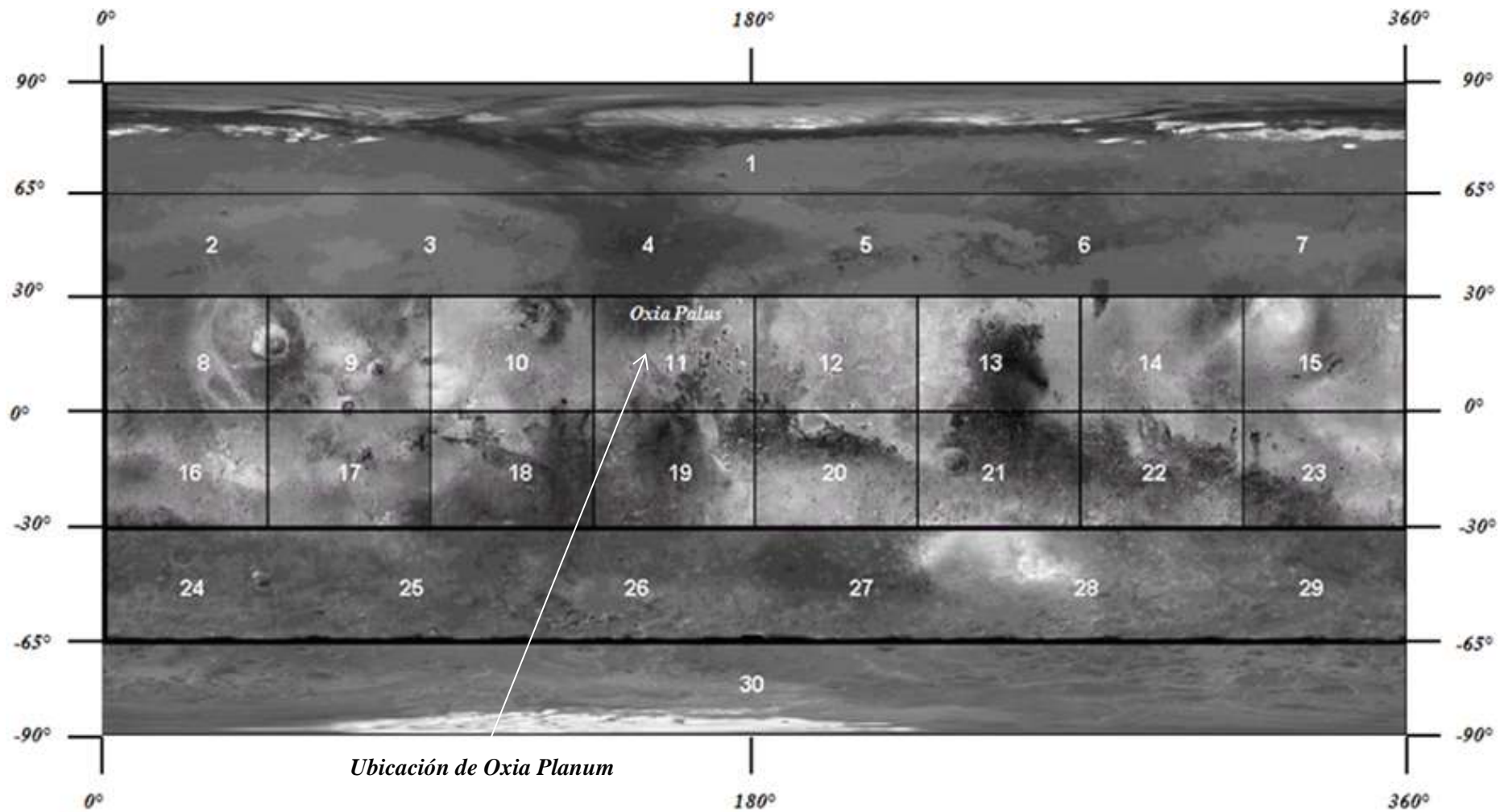


Figura 4.1 Mapa de la superficie de Marte dividida en cuadriláteros, se relaciona con la tabla 4.1. Modificada de Malin Space Science Systems <http://www.msss.com/mgchw/mgm/> 2010

## 4.2 *Oxia Palus*

Oxia Palus es uno de los treinta cuadriláteros de Marte, contiene a Oxia Planum, por lo que es pertinente conocer las características geológicas de esta zona.

Localizado en 0°- 45°W de longitud y 0°-30° N de latitud (Figura 4.1), incluye terrenos de las Tierras Bajas del Norte, Chryse Planitia y Acidalia Planitia delimitados por terrenos de las Tierras Altas del Sur: Xanthe Terra y Arabia Terra (Wyatt et al. 2003). Meridiani Planum pertenecen a Oxia Palus.

Oxia Palus es único en el sentido geográfico e importante por su ubicación entre las Tierras Altas del Sur y las Bajas del Norte. La diversidad en las formas del relieve observables en dicha región reflejan procesos geológicos activos y restos de efectos paleoclimáticos, lo que hace de esta región una de las más estudiadas de Marte.

La región Oxia Palus presenta composiciones entre litologías tipo 1 y tipo 2 que corresponden a la transición entre las Tierras Altas del Sur y las Bajas del Norte.

La litología tipo 1 que domina las Tierras Altas del Sur, ha sido identificada como un basalto con plagioclasa y piroxeno, protegido de la intemperie. La litología tipo 2, dominante en las Tierras Bajas del Norte, es un basalto alterado con poco piroxeno y mucho vidrío volcánico. En esta zona hay mucha presencia de arcillas (Wyatt et al. 2003).

En el cuadrilátero hay evidencias de agua líquida en el pasado marciano, existen geoformas como ríos, redes de valles, lagos, deltas y abanicos aluviales, además de gran cantidad de filosilicatos que pueden preservar evidencia de vida microscópica antigua.

Gracias al estudio de imágenes HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiter de la NASA, se halló en la región Shalbatana Vallis (al sur de Chryse Planitia) evidencia de un antiguo lago. Estudios indican que el agua estuvo 30 millas a lo largo del cañón, posteriormente se formó un delta alrededor de la cuenca.

### *4.3 Oxia Planum*

#### *4.3.1 Contexto general de Oxia Planum*

El sitio Oxia Planum se localiza al este de la región Chryse Planitia y al suroeste de Arabia Terra, en el cuadrilátero Oxia Palus (Figura 4.2) entre las coordenadas 18.20°N, 335.45°E (Figura 4.3). Con una elevación MOLA del rango de -5000 metros a -1000 metros (Figura 4.4).

Chryse Planitia es una zona plana perteneciente a las Tierras Bajas donde convergen los mayores canales de descarga y se cree que es una cuenca de impacto antigua.

Oxia Planum se caracteriza por pertenecer a las Tierras Altas del Sur en los terrenos de edad Noachiana. Diversos canales de salida diseccionan la zona y convergen hacia Chryse Planitia (Figura 4.2). Varios abanicos aluviales y/o deltas se han conservado en las salidas de los valles. Estos a menudo se extienden dentro de las cuencas, como es el caso en una de las elipses propuestas (The ExoMars 2018 Landing Site Selection Working Group, 2014).

#### *4.3.2 Elipse de aterrizaje para Oxia Planum*

La orientación de la elipse de aterrizaje con dimensiones de 104 km por 19 km cambiará dependiendo del momento del lanzamiento. Para el lanzamiento 2020 la orientación de la elipse puede variar entre 88° y 127° de azimut (The ExoMars 2018 Landing Site Selection Working Group, 2014).

Se han propuesto dos elipses en el área (Figura 4.3) con elevación MOLA entre -2.5 y -3.1 km. La elipse 1 se localiza dentro del sistema Coogoon Valles y la elipse 2 está al sur de la elipse 1 en una pequeña meseta. Ambos sitios incluyen muchos filosilicatos así como la presencia de pequeños cráteres de impacto y están en una superficie relativamente plana (The ExoMars 2018 Landing Site Selection Working Group, 2014).



*Figura 4.2 Oxia Planum. Mostrando la ubicación de Chryse Planitia y Arabia Terra. Modificada de <http://mars.nasa.gov/maps/explore-mars-map/fullscreen/> 2016.*



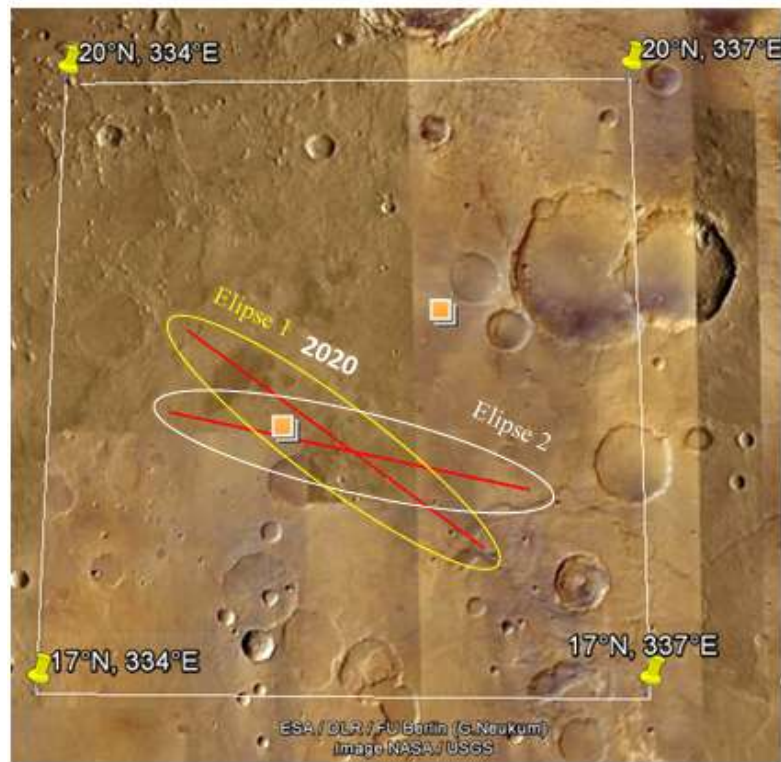


Figura 4.3 Elipse propuesta para el aterrizaje en 2020. Obtenida de Google Earth. 2016

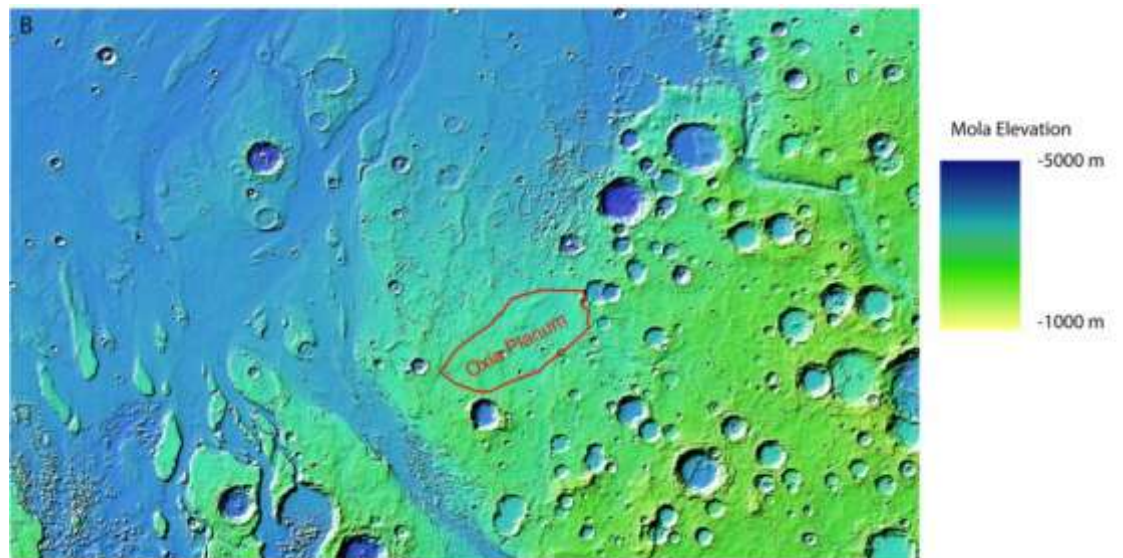


Figura 4.4 Rango de elevación en Oxia Planum. Tomada de Quantin, C. et al 2015. Presentado en Third Landing Site Selection Workshop

### 4.3.3 Mineralogía

De las observaciones que se obtienen de aparatos como OMEGA y CRISM de la NASA, se ha visto que la mayoría de las rocas expuestas en Chryse Planitia exhiben firmas de filosilicatos de Fe/Mg, probablemente de saponita, nontronita y vermiculita (The ExoMars 2018 Landing Site Selection Working Group, 2014).

Oxia Planum tiene una de las mayores exposiciones en éstos minerales cubriendo del 74% al 78 % de la superficie. Las bandas de absorción adicionales se encuentran en  $2.2 \mu\text{m}$  lo que indica una mezcla espectral entre filosilicatos de Fe/Mg y otros silicatos hidratados, por ejemplo arcillas de Al. Algunos afloramientos muestran una secuencia que incluye una roca madre con filosilicatos ricos en Fe/Mg cubiertos por una unidad de filosilicatos de Al y sílice hidratada exhibiendo firmas débiles de jarosita.

Con el espectrómetro de imágenes CRISM (Figura 4.5) se ha podido analizar la luz reflejada de ciertas partes de la superficie marciana. Se han detectado líneas de absorción a ciertas longitudes de onda. Usando los espectros de referencia obtenidos en los laboratorios se han podido identificar los materiales responsables para las líneas de absorción en Marte.

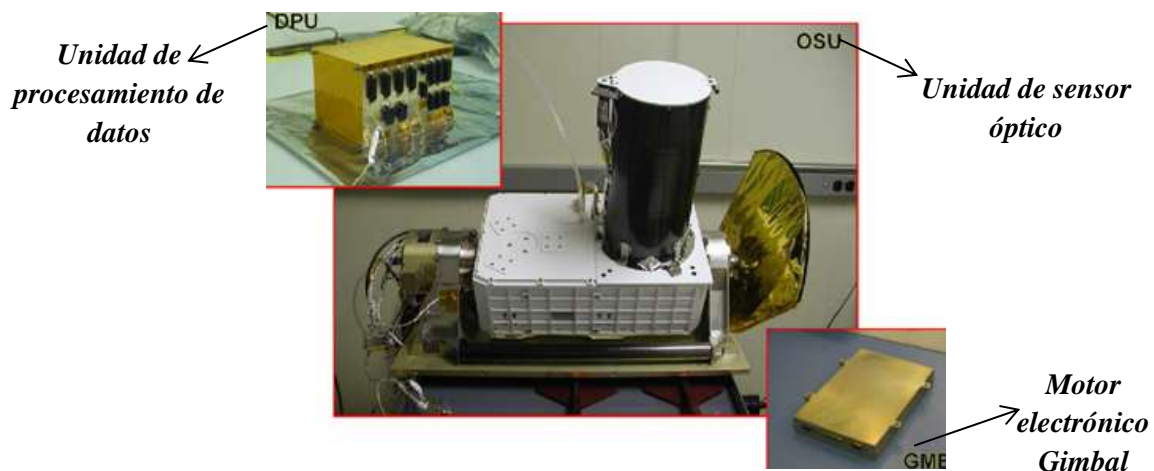


Figura 4.5 Espectrómetro CRISM. Tomada de <http://crism.jhuapl.edu/> NASA 2016.

Al analizar la luz reflectada de la superficie del Planeta Rojo al noroeste de Oxia Planum (Figura 4.6), CRISM detectó líneas de absorción a longitudes de onda que coinciden con las de minerales como vermiculita, saponita y nontronita.

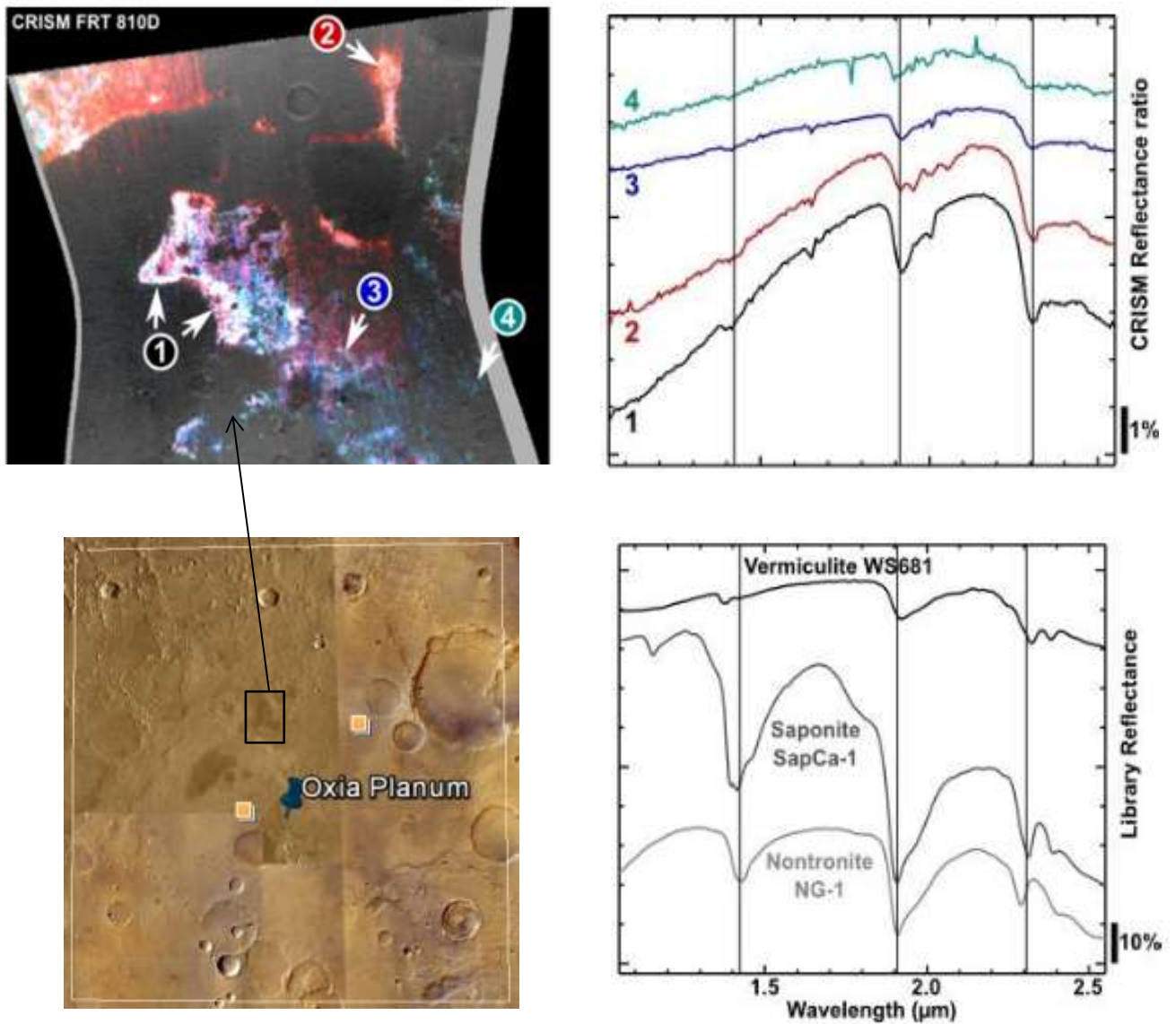


Figura 4.6 Valores de reflectancia obtenidos por CRISM al noroeste de Oxia Planum. Quantin, C., et al 2014.



Al centro de Oxia Planum, CRISM detectó valores de reflectancia a longitudes de onda que coinciden con los valores que corresponden a vermiculita, saponita y olivino (Figura 4.7).

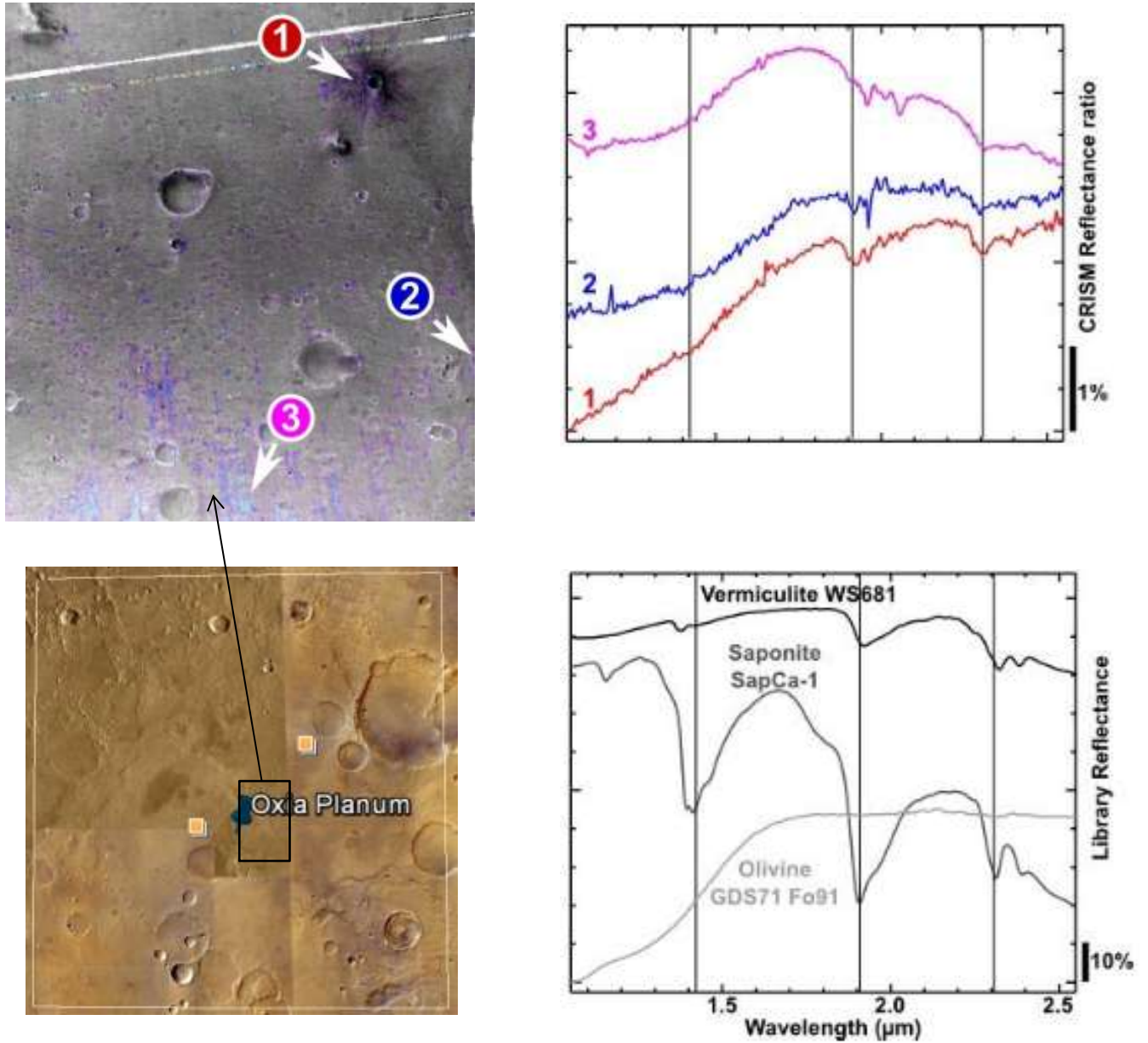


Figura 4.7 Valores de reflectancia obtenidos por CRISM al centro de Oxia Planum. Quantin, C., et al 2014.

Al sureste de la región Oxia Planum (Figura 4.8), el espectrómetro CRISM detectó siete firmas que coinciden con las de los minerales como olivino, montmorillonita, caolinita, saponita, vermiculita, nontronita y ópalo.

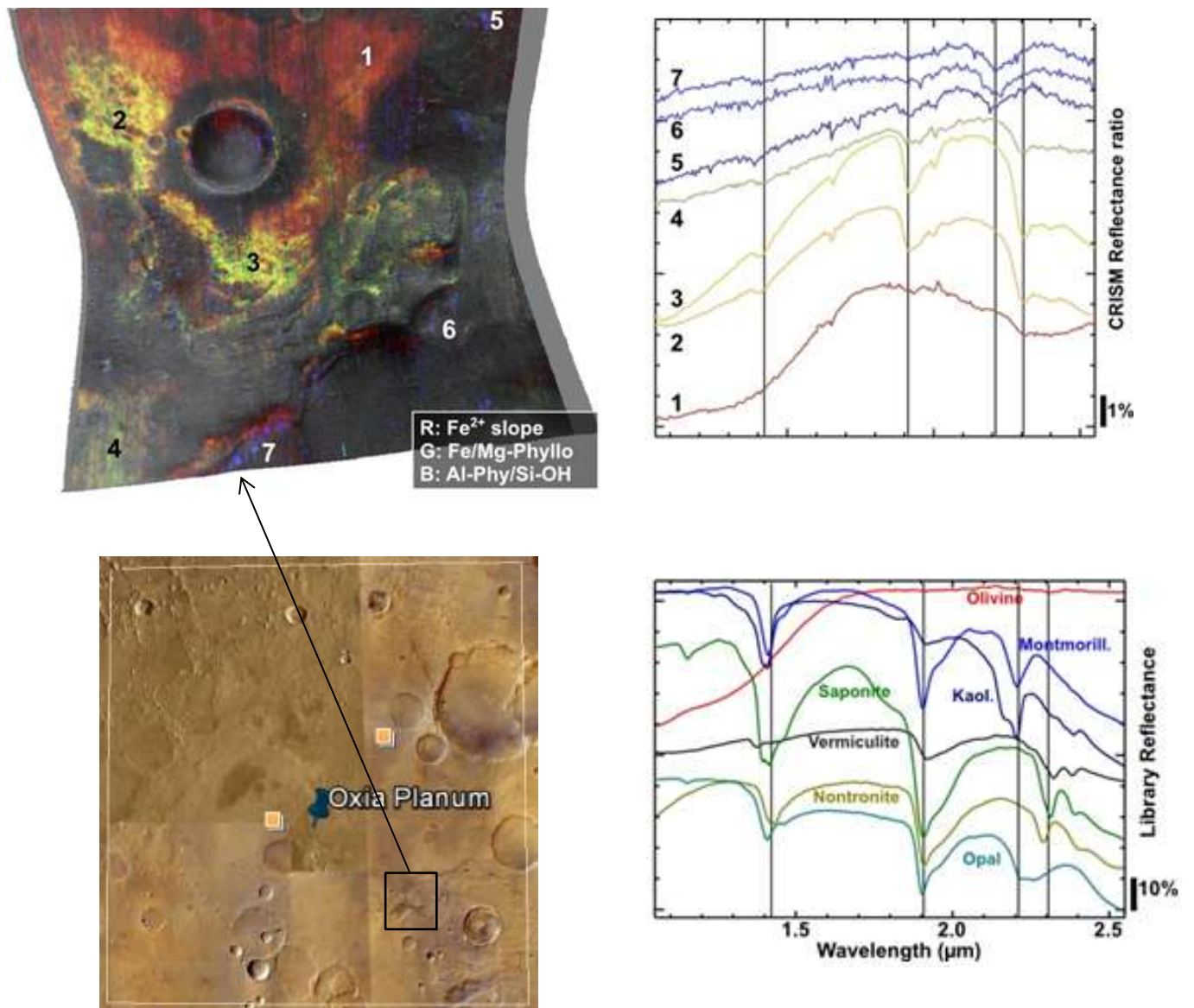


Figura 4.8 Valores de reflectancia obtenidos por CRISM al sureste de Oxia Planum. Quantin, C., et al 2014.

Con base en los resultados de CRISM, se integra la tabla siguiente (Tabla 4.2) que contiene todos los posibles minerales que pueden hallarse dentro de la zona Oxia Planum.

<i>Mineral</i>	<i>Fórmula Química</i>	<i>Descripción</i>
Nontronita	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2((\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Mineral asociado con la alteración hidrotermal de silicatos ricos en Fe o depósitos autigénicos precipitados a partir de fluidos hidrotermales. También puede aparecer como mineral secundario producto de alteración a la intemperie de rocas ígneas tipo basalto.
Saponita	$(\text{Ca}, \text{Na})_{0.3}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Se forma por deposición hidrotermal en silicatos cálcicos.
Vermiculita	$\text{Mg}_{0.7}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_6(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Mineral compuesto básicamente por silicatos de aluminio, magnesio y de hierro. Se origina principalmente por la alteración hidrotermal de la biotita
Olivino	Forsterita ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) Fayalita ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ )	Las variedades ricas en magnesio (forsterita) aparecen en rocas ultrabásicas, básicas y en lamproitas (peridotitas, gabros, basaltos, fortunitas, jumillitas, veritas, etc.), mientras que el término rico en hierro (fayalita) es más común en rocas carbonatadas metamórficas.
Ópalo	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Mineraloide, la composición es la misma que el cuarzo con la diferencia que el ópalo está hidratado, es decir, tiene moléculas de agua en su composición.

Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Aparece como producto de alteración hidrotermal o meteórico de rocas que contienen feldspatos y moscovita. También en sedimentos a partir de la erosión de rocas ácidas caolinitizadas.
Montmorillonita	$(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	La montmorillonita se forma a través de la alteración de los minerales de silicatos en condiciones alcalinas, en las rocas ígneas básicas, tales como la ceniza volcánica. En ambiente sedimentario de clima tropical por alteración de los feldspatos y en ambiente hidrotermal por alteración de vidrio volcánico y tobas.

Tabla 4.2 Posibles minerales en Oxia Planum. Información obtenida de Deer, W.A. et al 1992.

Los minerales presentados en la tabla 4.2, con excepción del olivino y el ópalo, pertenecen al grupo de los filosilicatos que tienen en su gran mayoría un origen secundario, que se forman como resultado de la alteración de los minerales primarios o de otros silicatos tanto de mayor como de menor complejidad.

En la mayoría de los casos son originados por alteración hidrotermal, término general que incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, en térmicos químicos y termales, en la presencia de agua caliente o vapor. La característica distintiva de la alteración hidrotermal es la importancia del fluido hidrotermal en transferir constituyentes y calor. En efecto, la alteración hidrotermal involucra la circulación de volúmenes relativamente grandes de fluidos calientes atravesando las rocas permeables debido a la presencia de fisuras o poros interconectados.

El fluido tiende a estar considerablemente fuera de equilibrio termodinámico con las rocas adyacentes y esto genera las modificaciones en la composición mineralógica original de las rocas, puesto que componentes en solución y de los minerales sólidos se intercambian para lograr un equilibrio termodinámico (Corbett & Leach 1998).

#### 4.3.4 Historia geológica

La edad del lugar en donde se localizan las elipses de aterrizaje en Oxia Planum se ha fechado como noachiano medio y tardío, sugiriendo una edad entre 3.6 mil millones de años y 4 mil millones de años. Esta edad (ver figura 4.9) fue obtenida con base en la densidad superficial de cráteres/ km<sup>2</sup> y el diámetro de la zona (Quantin et al. 2014).

El origen de los sedimentos en Oxia Planum parece indeterminado. Es una zona aun inexplorada. Dichos sedimentos pudieron haberse depositado hace 4 mil millones de años y luego erosionados por los impactos hasta el final del Hesperiano (The ExoMars 2018 Landing Site Selection Working Group, 2014).

Los valles que se observan dentro de Oxia Planum no forman una red bien desarrollada, sin embargo, hacia el sur de la elipse 1 hay valles desarrollados que se pudieron derivar de un sistema de canales de escorrentía.

El análisis inicial de Oxia Planum indica que es ampliamente consistente con los objetivos científicos y las limitaciones de ingeniería de la Misión ExoMars.

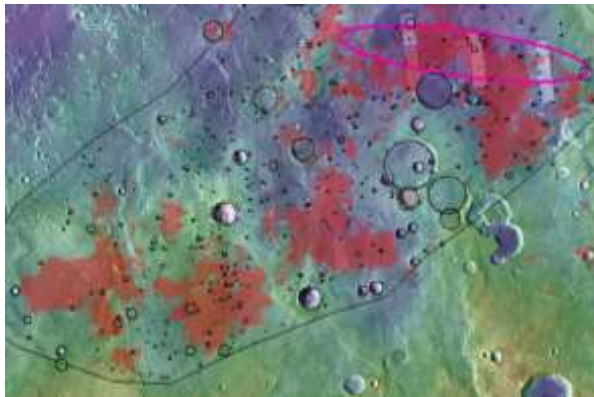
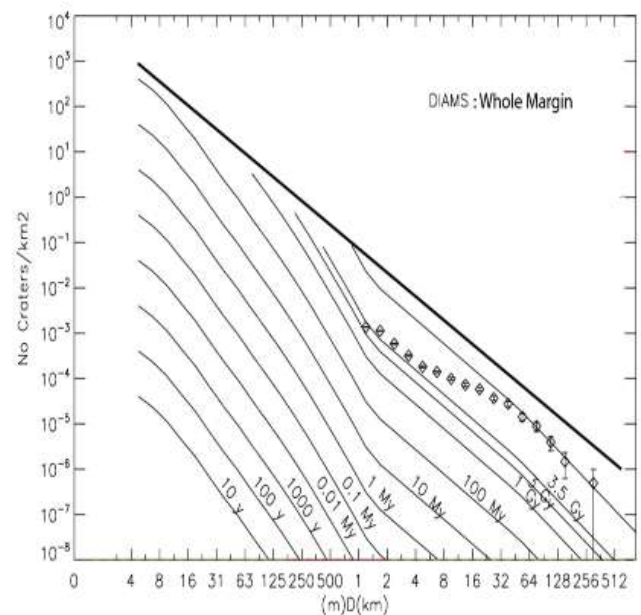


Figura 4.9 Obtención de la edad de Oxia Planum  
Tomado de Quantin, C., et al 2014.





# 5

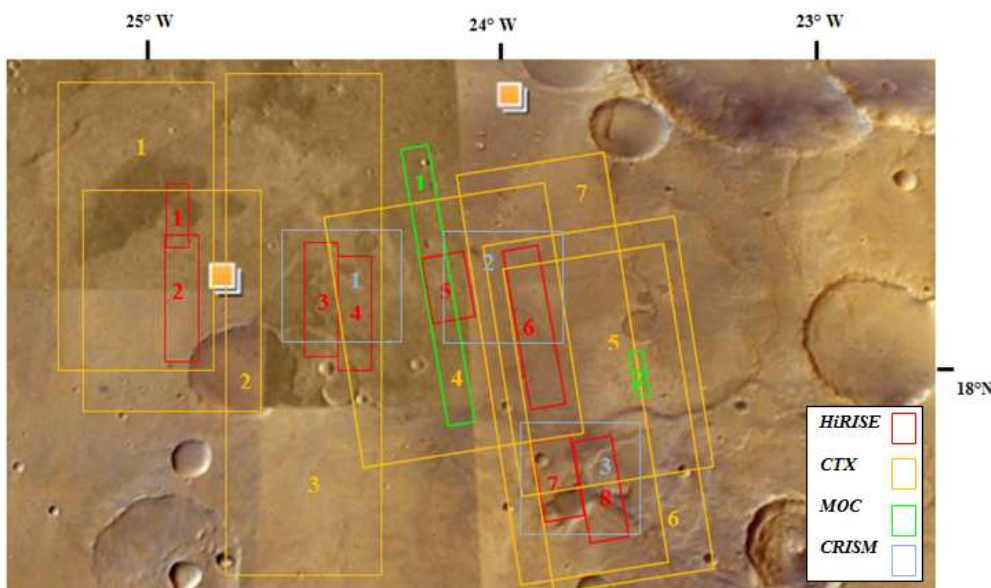
## Análisis geológico de Oxia Planum

### 5.1 Metodología

Para el análisis de Oxia Planum se utilizaron imágenes de la región usando la aplicación Google Earth que permite el acceso a imágenes satelitales, fotografías aéreas, datos SIG y modelos creados por computadora.

Las últimas versiones de Google Earth (5.0) permiten al usuario visualizar el planeta Marte, por medio de la gran cantidad de imágenes tomadas por diferentes misiones espaciales enviadas a dicho planeta.

La opción Spacecraft Imagery muestra las imágenes capturadas por High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE), Contex Camera (CTX), Mars Orbiter Camera (MOC) y Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM). Para este trabajo se seleccionaron únicamente las imágenes que están dentro de las elipses de aterrizaje (Figura 5.1).



*Figura 5.1  
Imágenes  
disponibles dentro  
de las elipses de  
aterrizaje en Oxia  
Planum. Google  
Earth 2015.*

### *5.1.1 Selección de imágenes*

De las imágenes disponibles mostradas en la figura 5.1 solo se utilizaron un total de 11 imágenes que cubren toda el área de ambas elipses de aterrizaje, dichas imágenes muestran morfologías interesantes.

### *5.1.2 High Resolution Imaging Science Experiment (HiRISE)*

La serie de imágenes observadas por HiRISE de la astronave Mars Reconnaissance Orbiter de la NASA ha estado operando desde 2006, tienen una resolución de la imagen de 0.25 metros/píxel. El rango espectral de HiRISE es de 400 a 600 nm (Azul-Verde), 550 a 850 nm (Rojo), 800 a 1000 nm (IR), su campo de visión es de  $1.14^\circ$  y contiene un detector de 14 x 2048 píxeles

La cámara produce imágenes en luz visible con una resolución nunca antes vista en misiones de exploración planetaria. HiRISE también hace observaciones en longitudes de onda cercano al infrarrojo para obtener información sobre los minerales presentes, a una altura que varía de 200 a 400 kilómetros (mars.nasa.gov 2016).

De HiRISE se tomaron las imágenes de nombre PSP\_009880\_1985, PSP\_003195\_1985, ESP\_037136\_1985 y ESP\_037703\_1980 (Apéndice 1).

### *5.1.3 Context Camera (CTX)*

Context Camera (CTX) pertenece a la Mars Reconnaissance Orbiter de la NASA operando desde 2006. Posee un rango espectral de 500 a 800 nm (rojo), un campo de visión de 6°, un detector de 5064 pixeles y posee una resolución de 6 metros/ pixel.

CTX lleva a cabo observaciones simultáneas con las imágenes de alta resolución de HiRISE y los datos recogidos por el espectrómetro CRISM (mars.nasa.gov 2016).

Para analizar a Oxia Planum se usaron las imágenes CTX presentadas en el apéndice 2 de nombres F20\_043690\_1986\_XN\_18N025W, P22\_009735\_1977\_XN\_17N024W, F12\_040433\_1983\_XN\_18N024W y F10\_039721\_1980\_XN\_18N023W.

### *5.1.4 Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM)*

CRISM es un espectrómetro de la Mars Reconnaissance Orbiter de la NASA que opera desde 2006. Busca rastros de minerales que se forman en presencia de agua que pudieran haber existido en la superficie de Marte.

CRISM lee los colores en la luz reflejada para detectar patrones que indican la presencia de ciertos minerales en la superficie. Posee una resolución de 15.7 a 19.7 metros/ pixel; un rango espectral de 362-1054 nm (rango de visible V a infrarrojo cercano NIR) y 1002-3920 nm (IR) y campo de visión de 2.12° (mars.nasa.gov 2016).

En este trabajo se usaron las imágenes de CRISM de nombres FRT0000810D\_07\_IF166L\_TRR3.LBL, FRT00004686\_07\_IF166L\_TRR3.LBL y FRT00009A16\_07\_IF166L\_TRR3.LBL presentadas en el apéndice 3 además de las imágenes con parámetros espectrales del apéndice 4.

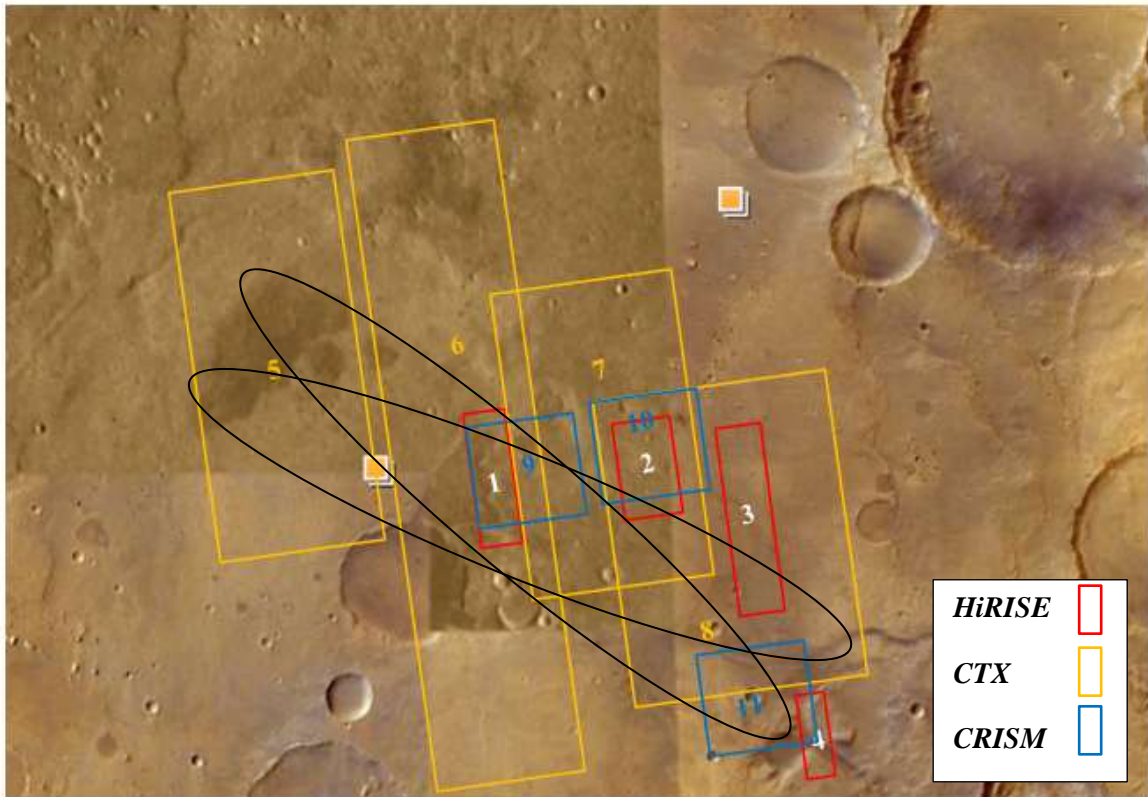


Figura 5.2 Imágenes elegidas en Oxia Planum. Google Earth 2015.

## 5.2 Antecedentes geológicos

Quantin et al. (2014) marcan las unidades geológicas presentadas en la figura 5.3. Se observa que en el lado oeste de ambas elipses existen unidades de flujo de lava recientes y del lado este hay presencia de depósitos fluviales. Toda el área está cubierta por filosilicatos.

Para analizar la historia geológica de Oxia Planum se procedió a dividir el área comprendida entre las elipses de aterrizaje en tres partes, llamándolos sector 1, 2 y 3. Con base en los estudios de Quantin et al. (2014) y la selección de las 11 imágenes se ha descrito todo lo observado en cuanto a geomorfología y mineralogía para cada sector.

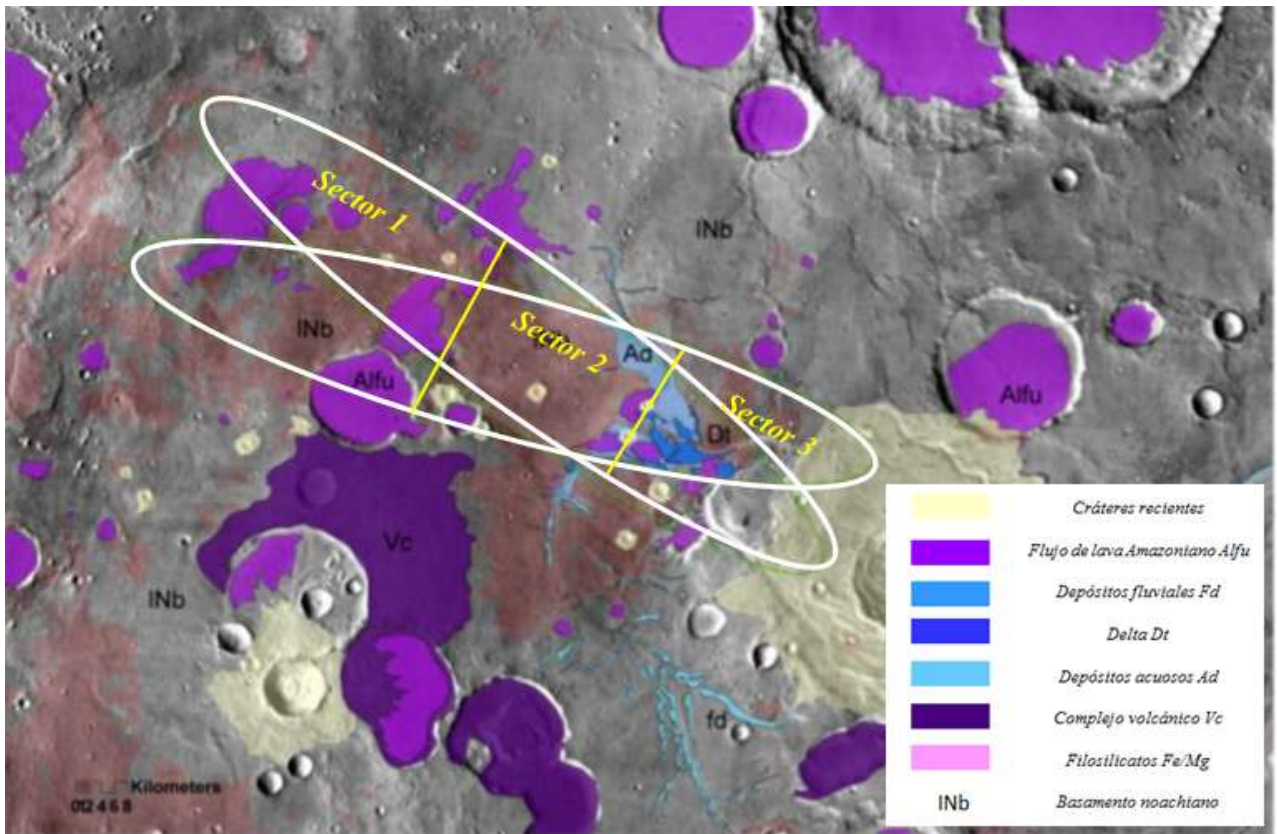


Figura 5.3 Unidades geológicas detectadas en Oxia Planum. Modificado de Quantin et al. 2014.



### 5.3 Análisis del sector 1

Se nombró sector 1 a la parte noroeste de las elipses de aterrizaje. Para analizar la región se utilizaron las imágenes HiRISE PSP\_009880\_1985 (Apéndice 1), CTX P22\_009735\_1977\_XN\_17N024W, CTX P22\_009735\_1977\_XN\_17N024W (Apéndice 2) y CRISM FRT0000810D\_07\_IF166L\_TRR3.LBL (Apéndice 3 y 4).

Los colores azul y rojo (Figura 5.4) marcan las áreas donde el instrumento CRISM (Apéndice 4.1) detectó filosilicatos de Fe/Mg, sulfatos hidratados y hielo de H<sub>2</sub>O

La unidad representada en color morado según Quantin et al. (2014) es un flujo de lava reciente.

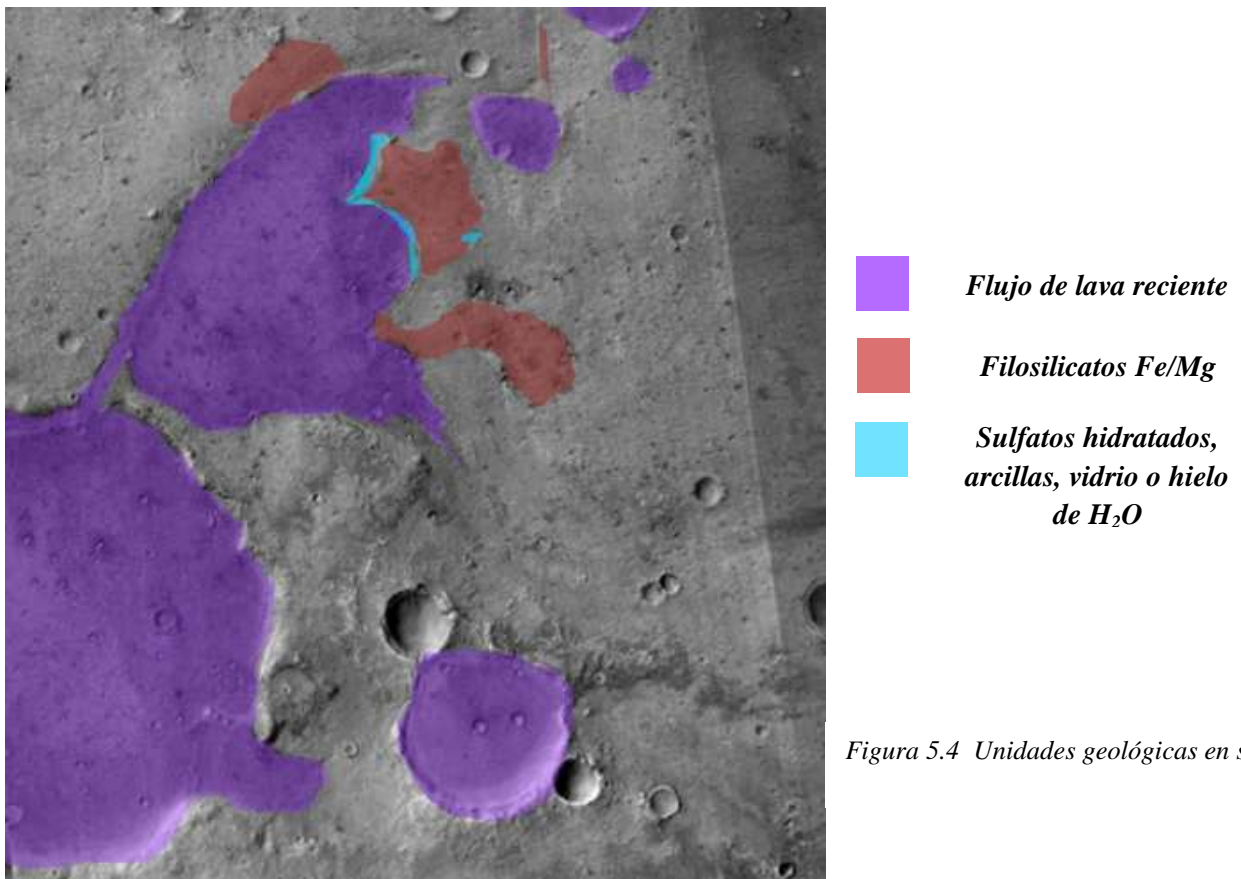


Figura 5.4 Unidades geológicas en sector 1

Se observa que la capa de lava presenta una textura rugosa y el borde parece irregular (Figura 5.5). Se realizó el perfil de elevación entre los puntos A-B (Figura 5.6) que nos permite ver la transición entre la capa de lava y las exposiciones de filosilicatos.

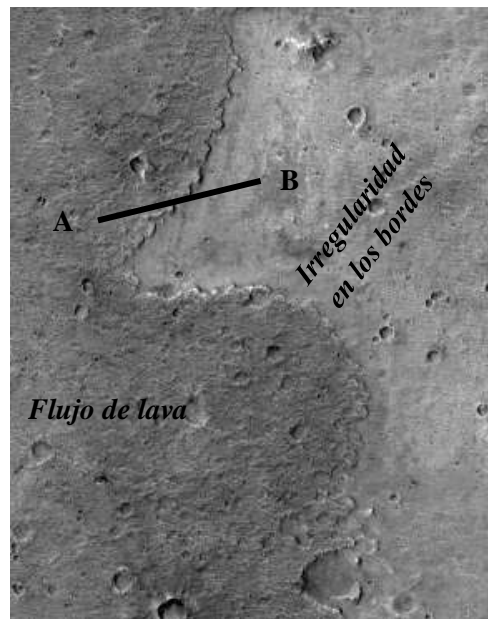


Figura 5.5 Flujo de lava y filosilicatos en sector 1

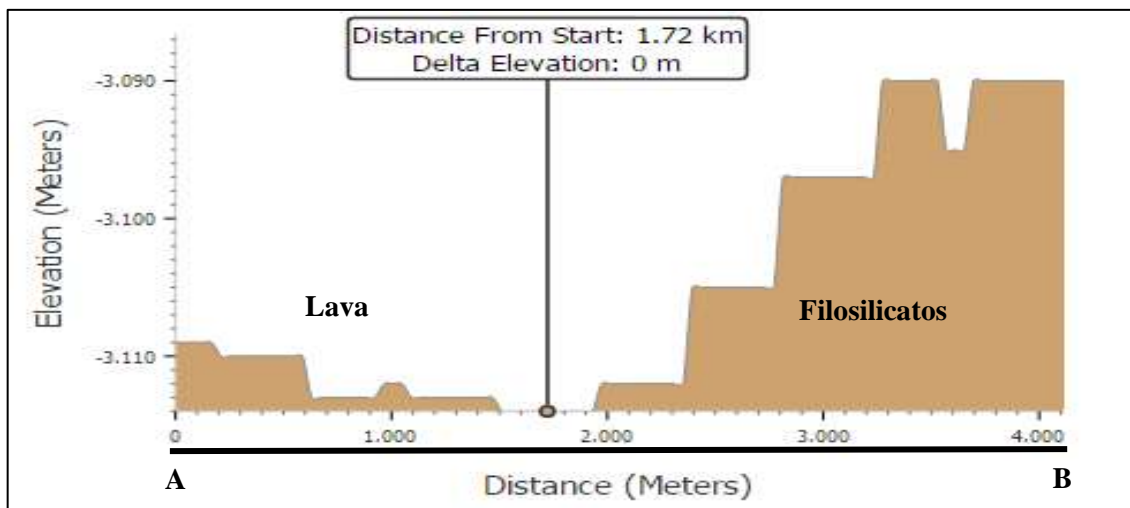


Figura 5.6 Perfil de elevación A-B. Elaborado en <http://mars.nasa.gov/maps/explore-mars-map>

Quantin et al. (2014) estimaron la edad del área, con base en la densidad superficial de cráteres del flujo de lava y de las exposiciones de filosilicatos y encontraron que se trata de lava reciente del Amazoniano de 2.570 mil millones de años, mientras que los filosilicatos muestran una edad de 3.9 mil millones de años. (Figura 5.7).

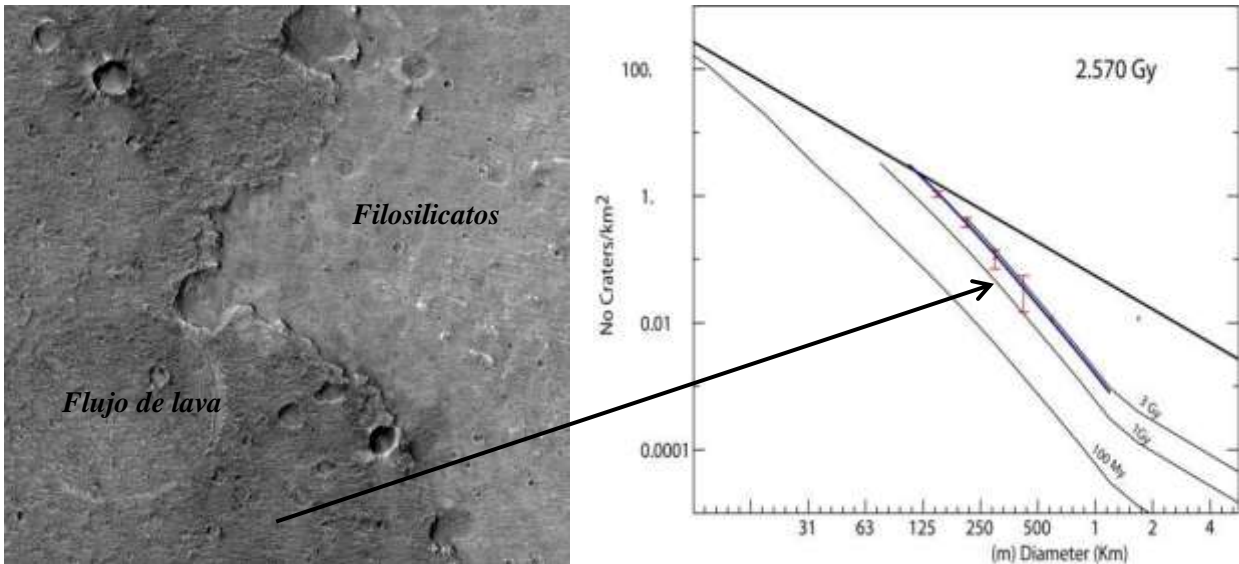


Figura 5.7 Estimaciones de las edades con base en la densidad de cráteres. Tomado de Quantin et al, (2014).

### 5.3.1 Resultados para el sector 1

El terreno en esta zona está cubierto por filosilicatos de hierro y magnesio, posiblemente nontronita, saponita y vermiculita (Quantin et al. 2014). Su presencia implica que el agua líquida interactuó con rocas que datan del Noachiano. Las fuertes firmas que genera el espectrómetro CRISM de dichos minerales, sugieren que un gran caudal de agua debió haber pasado por las rocas y el suelo.



El terreno muestra evidencia de antiguos canales con minerales (nontronita, saponita y vermiculita) que pudieron haber sido claramente transportados por el agua.

El flujo de lava data del Hesperiano (2.6 Ga), con base en el perfil de elevación, tiene un espesor de 30 metros. Esta unidad es evidentemente de origen más reciente y probablemente está cubriendo un área de filosilicatos.

El hecho de tener bordes irregulares en el flujo de lava y que sea justamente en los bordes donde CRISM detecte las firmas más fuertes de filosilicatos, hace pensar que la erosión del viento ha exhumado los filosilicatos que se encuentran debajo de la lava.

### 5.4 Análisis del sector 2

La parte central de las elipses de aterrizaje se nombró sector 2 y para su estudio se utilizaron las imágenes:

HiRISE PSP\_003195\_1985 (Apéndice 1), CTX F12\_040433\_1983\_XN\_18N024W (Apéndice 2) y CRISM FRT00004686\_07\_IF166L\_TRR3.LBL (Apéndice 3 y 4).

Con base en los datos producidos por CRISM (Apéndice 4.2) este terreno está cubierto por una capa de filosilicatos con minerales como saponita y vermiculita (Figura 5.8).

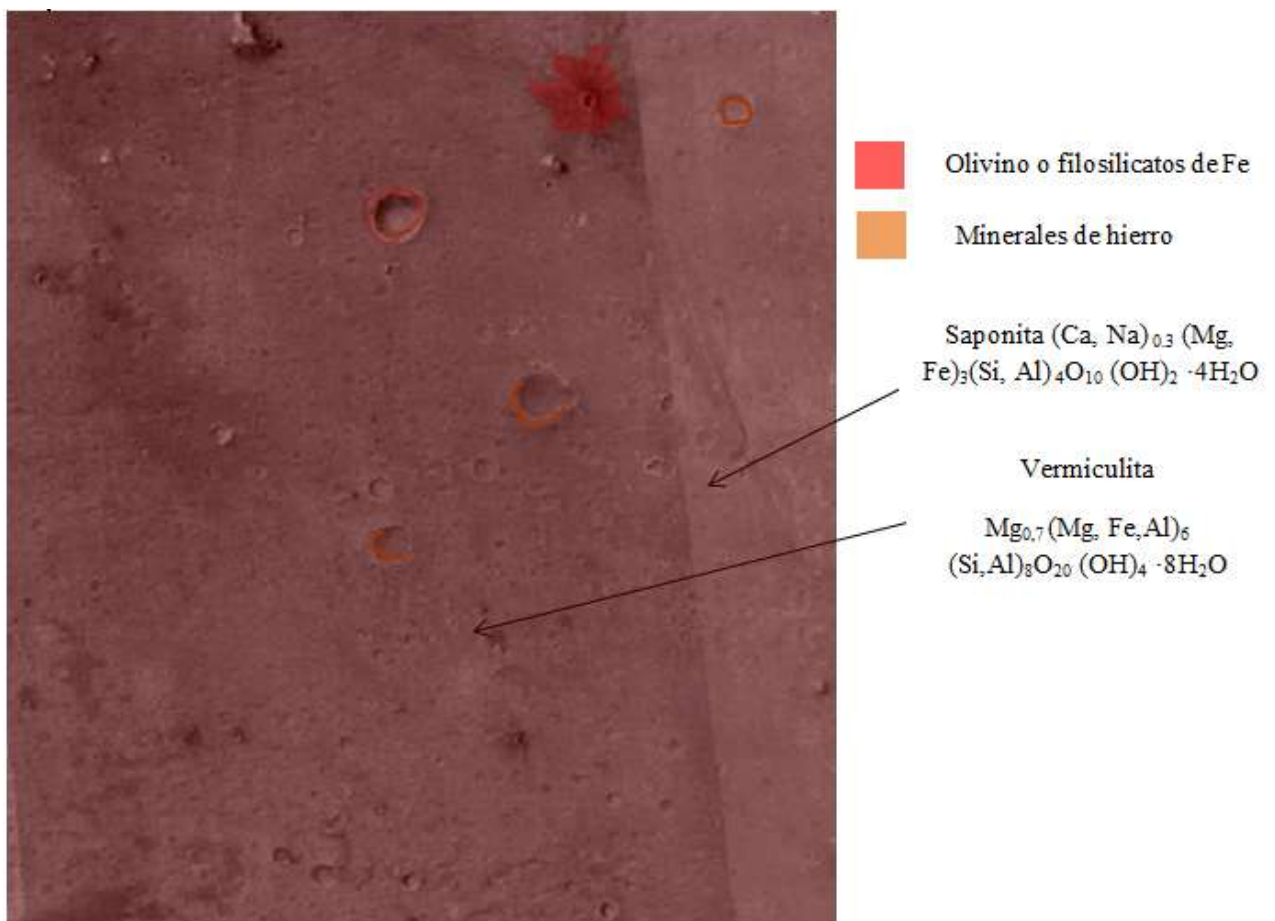


Figura 5.8 Filosilicatos en el sector central

Además de ser un terreno cubierto por filosilicatos, parece fuertemente craterizado. Según Anguita (1998) existen 4 tipos de cráteres marcianos (Tabla 5.1). En Oxia Planum solo se tienen cráteres antiguos.

<i>Tipo</i>	<i>Características</i>
Cuencas de impacto	135 a 2000 km de diámetro, mucho menos frecuentes que en la Luna o Mercurio, sin anillos múltiples
Cráteres amurallados	Diámetros mayores de 5 km, sólo entre 40°N y 40°S
Cráteres con pedestal	Sólo cerca de los polos, eyectas circulares, con frecuente escarpe exterior
Cráteres antiguos	Borde muy erosionado, fondo plano, sin cráteres secundarios ni eyecta.

Tabla 5.1 Cráteres de impacto en Marte. (Anguita 1998).

Para poder determinar el tipo de cráteres que se encuentran en el sector 2 se ha llevado a cabo el análisis de dos de los fondos de los cráteres más grandes en la región (Figura 5.9). Se obtuvieron sus perfiles de elevación (Figura 5.10 y 5.11)

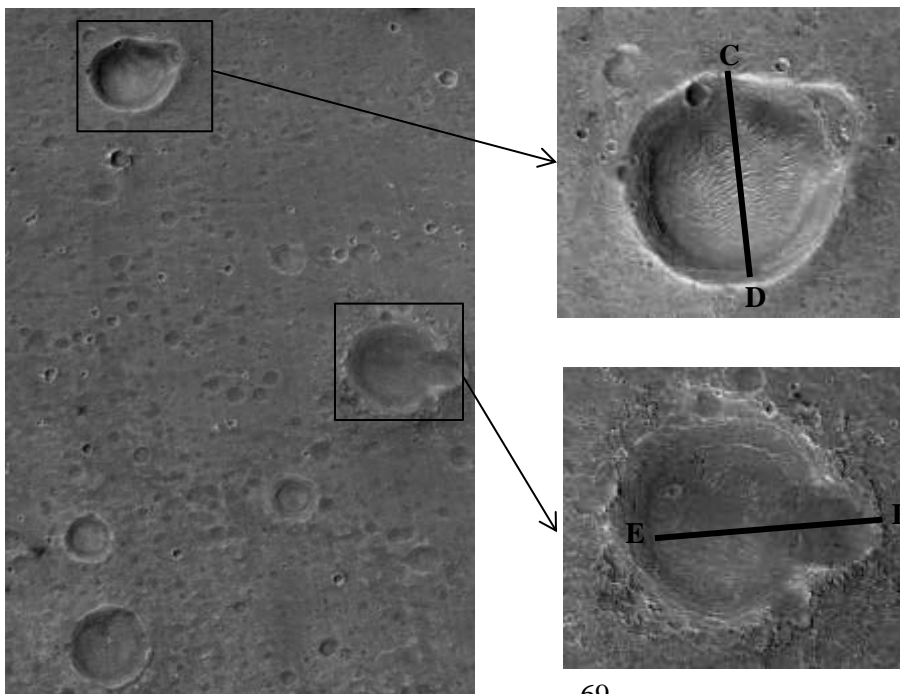


Figura 5.9 Cráteres en el sector central

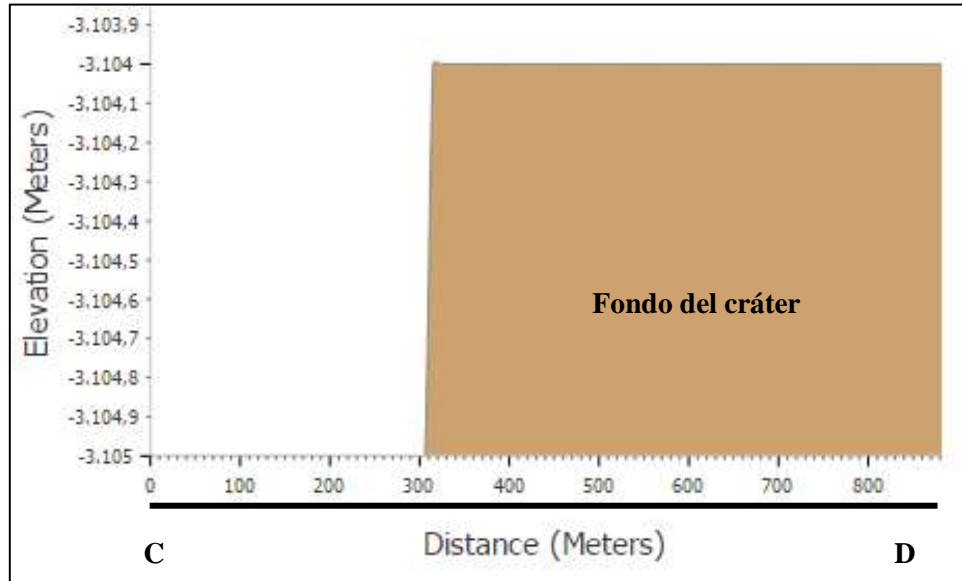


Figura 5.10 Perfil de elevación C-D. Elaborado en <http://mars.nasa.gov/maps/explore-mars-map>

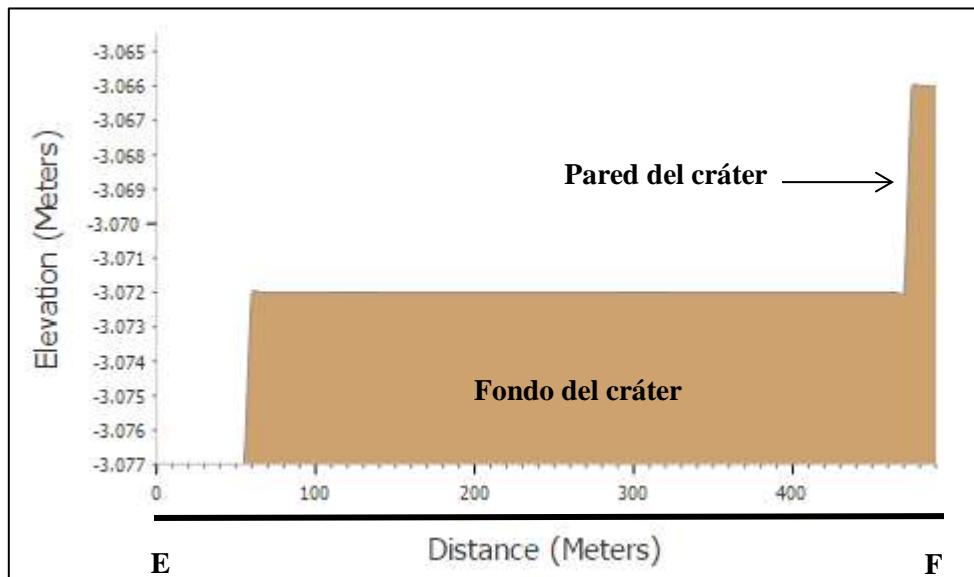


Figura 5.11 Perfil de elevación E-F. Elaborado en <http://mars.nasa.gov/maps/explore-mars-map>

#### *5.4.1 Resultados para el sector 2*

Según lo presentado en la tabla 5.1, los cráteres en el sector central presentan un fondo plano. Su diámetro es de aproximadamente 500 metros. En ninguno se nota la presencia de eyecta por lo cual se descartan cráteres amurallados, con pedestal y cuencas de impacto. Entonces se trata de cráteres antiguos.

La superficie que conforma la parte central de las elipses de aterrizaje no muestra morfologías de interés que puedan indicarnos interacción con el agua líquida. Debido a la alta densidad de cráteres y su tipo es una superficie antigua, posiblemente del Noachiano.

### 5.5 Análisis sector 3

Para el estudio del sector 3 se utilizaron las imágenes: HiRISE ESP\_037136\_1985, ESP\_037703\_1980 (Apéndice 1) CTX F10\_039721\_1980\_XN\_18N023W (Apéndice 2) y CRISM FRT00009A16\_07\_IF166L\_TRR3.LBL (Apéndice 3 y 4).

En este sector destacan tres zonas bastante interesantes, marcadas con números del 1 al 3 en la Figura 5.12: canales de desbordamiento, morfologías asociadas con agua líquida y canales invertidos. CRISM detectó filosilicatos de Fe/Mg y hielo de H<sub>2</sub>O (Apéndice 4).

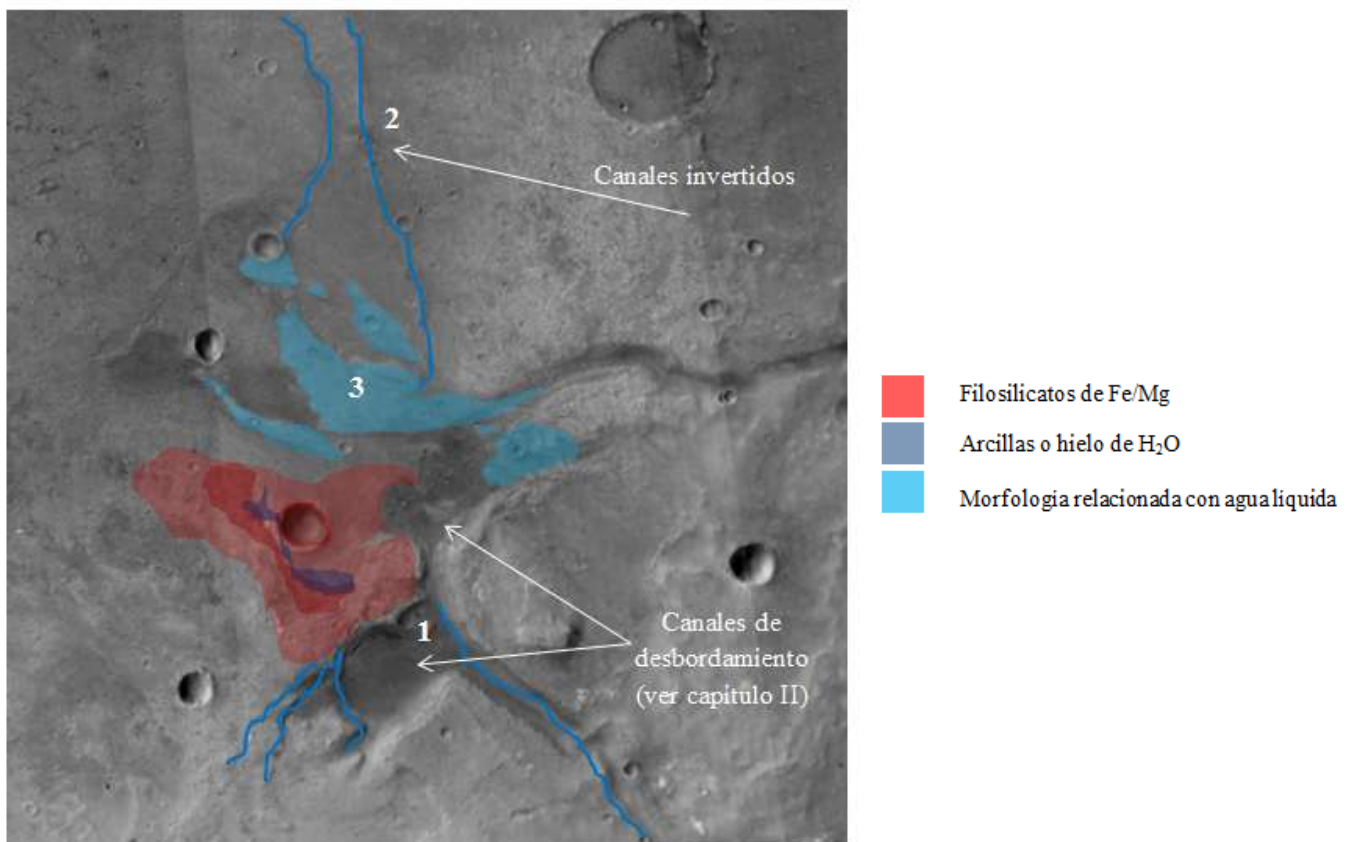


Figura 5.12 Sector 3 al sureste de las elipses de aterrizaje. (1) Canales de desbordamiento, (2) morfologías asociadas con agua líquida y (3) canales invertidos.

Se ha marcado con número 1 en la figura 5.12 a las formas que parecen ser canales marcianos (Figura 5.13). Se realizaron dos perfiles de elevación para determinar la anchura de los canales así como el piso con el fin de clasificarlos en canales de desbordamiento, escorrentía o corroídos (Figura 5.14 y 5.15).

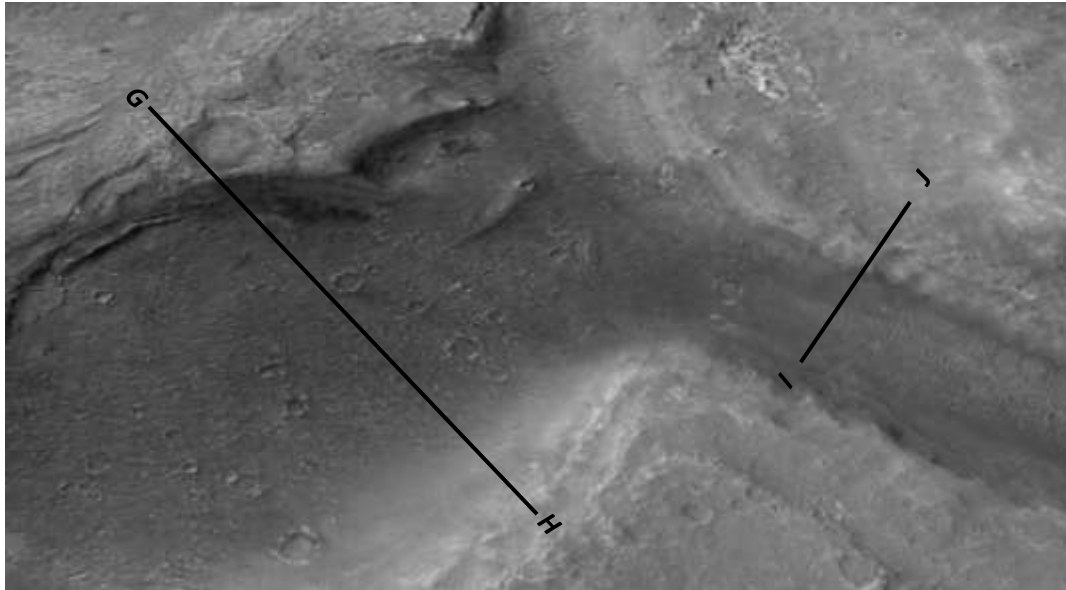


Figura 5.13 Canales en sector 3

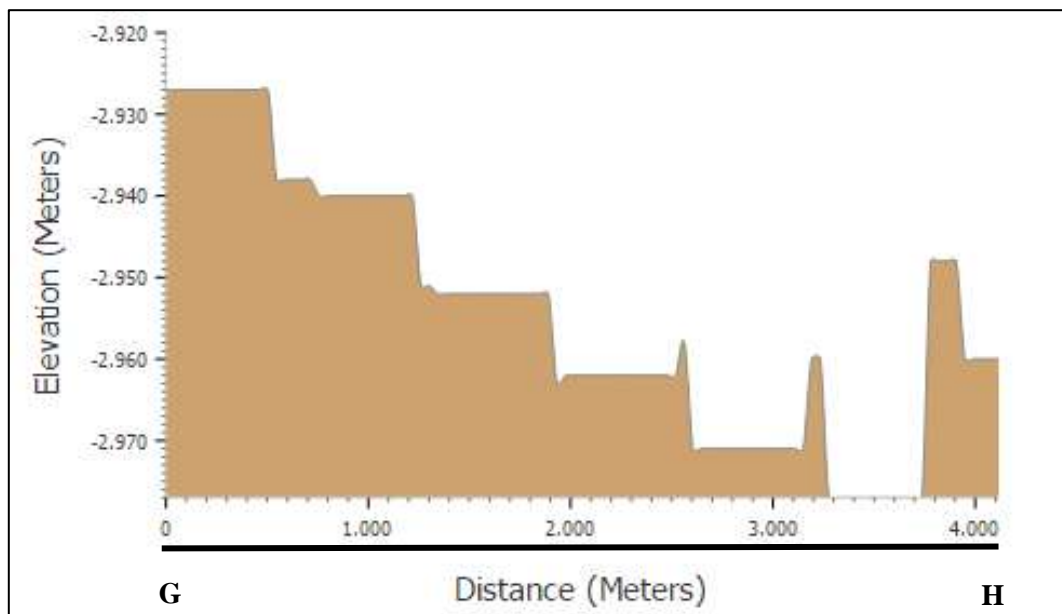


Figura 5.14 Perfil de elevación G-H. Elaborado en <http://mars.nasa.gov/maps/explore-mars-map>

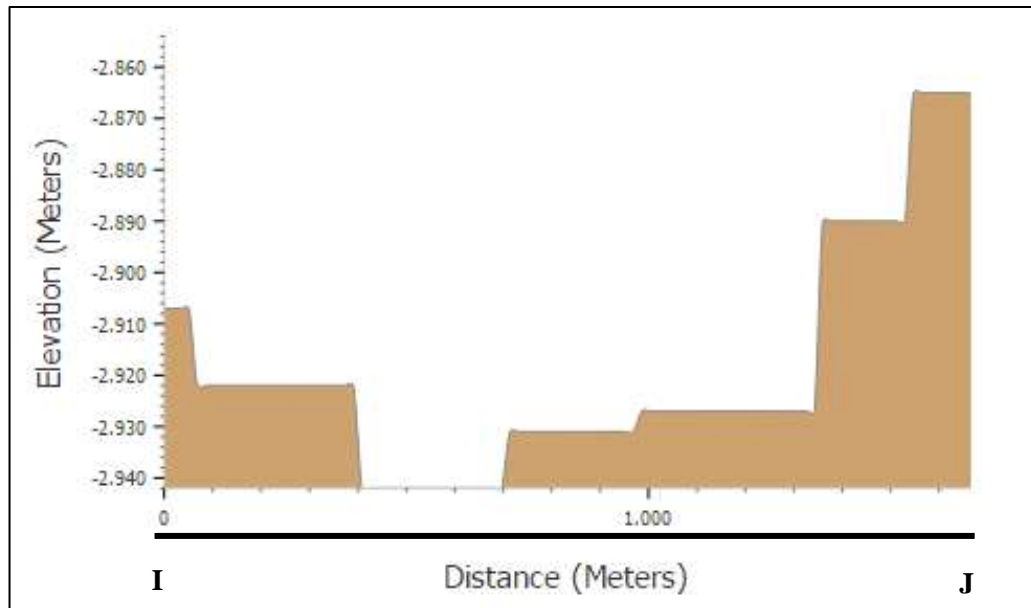
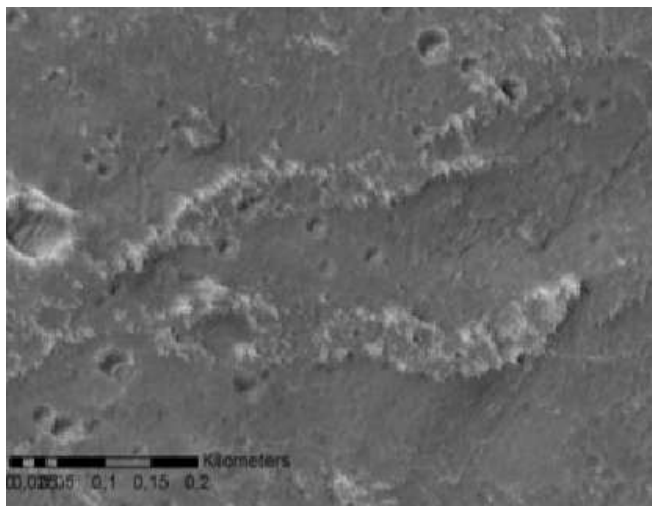
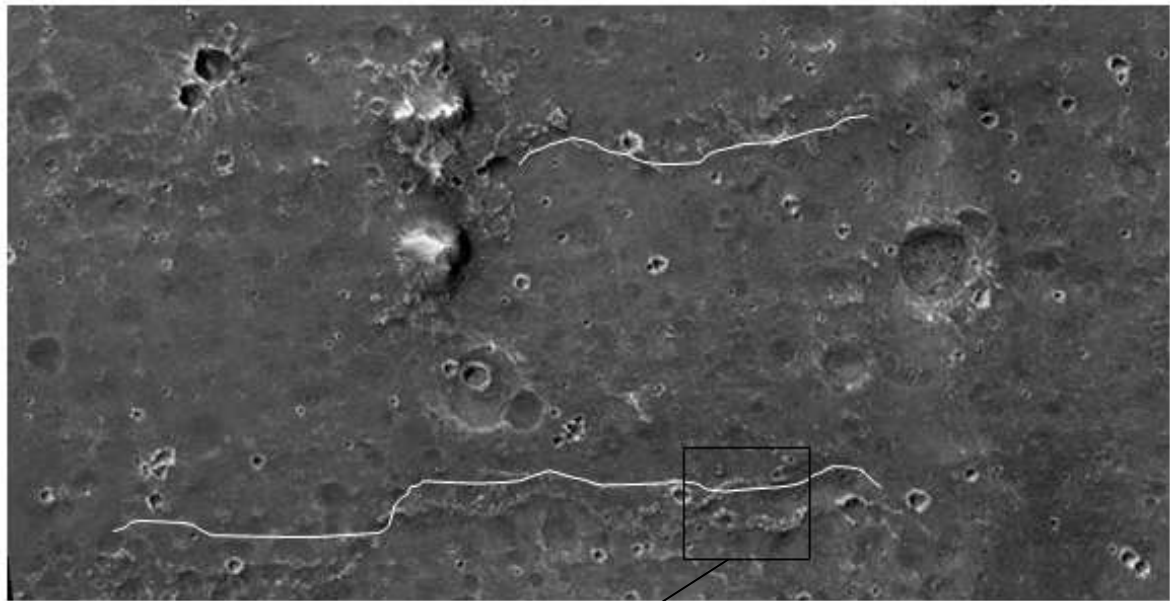


Figura 5.15 Perfil de elevación I-J. Elaborado en <http://mars.nasa.gov/maps/explore-mars-map>

Se observa que el fondo de los canales es irregular en ambas secciones con paredes empinadas. El ancho de los canales varía de 2 km hasta 4 km y su profundidad oscila alrededor de 700 metros. Se clasifican como canales de desbordamiento (Capítulo 2).



Con número 2 (Figura 5.12) se han marcado otro tipo de canales coincidentes con morfologías invertidas o eskers descritos en el capítulo 2. Los canales aparecen con una topografía más elevada, resultado de procesos erosivos o depósitos glaciares (Figura 5.16).



Las partes marcadas con una línea blanca parecen ser antiguos canales, con una topografía más elevada.

*Figura 5.16 Canales invertidos en el sector 3.*

Al sureste del sector, numerado con 3 (Figura 5.12) se observa una estructura triangular con terminaciones digitiformes similar a lo que en la Tierra se conoce como un abanico aluvial o un delta.

La superficie parece lisa, no se observan a simple vista sedimentos de grano grueso, pero las imágenes son insuficientes para afirmarlo por lo que se realizó el perfil K-L (Figura 5.17), observando que la pendiente no es abrupta como para transportar sedimentos muy gruesos, lo que indica que se tratan de sedimentos finos. Si recordamos, en la Tierra los abanicos aluviales son preferentemente cuerpos de sedimentos muy gruesos a gruesos por lo que esta estructura se clasifica como un delta.

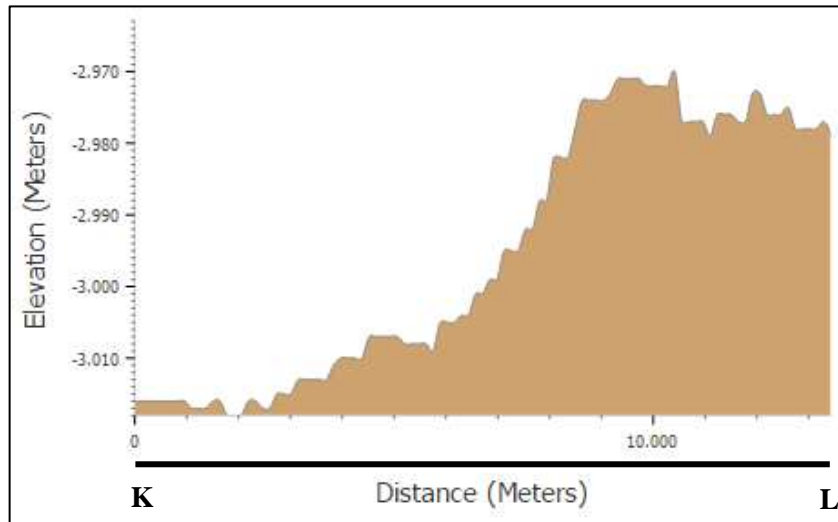
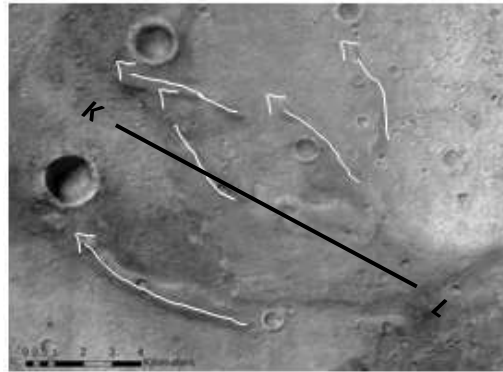


Figura 5.17 Perfil K-L. Elaborado en <http://mars.nasa.gov/maps/explore-mars-map>

Al compararlo con el delta marciano Eberswalde (Figura 5.19) observamos características similares con la diferencia de que en Oxia Planum los canales no son tan marcados, la edad se estima en 3.7 mil millones de años (Figura 5.18), inicios del Hesperiano (Quantin et al. 2014).

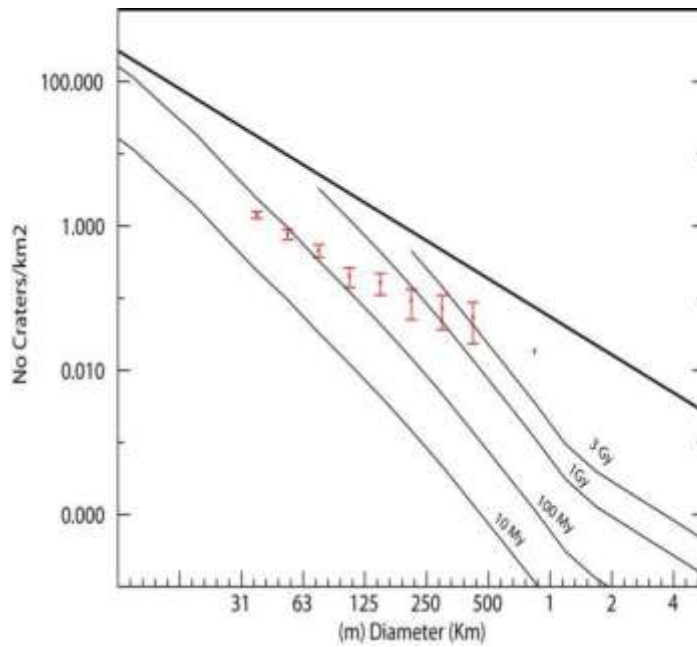
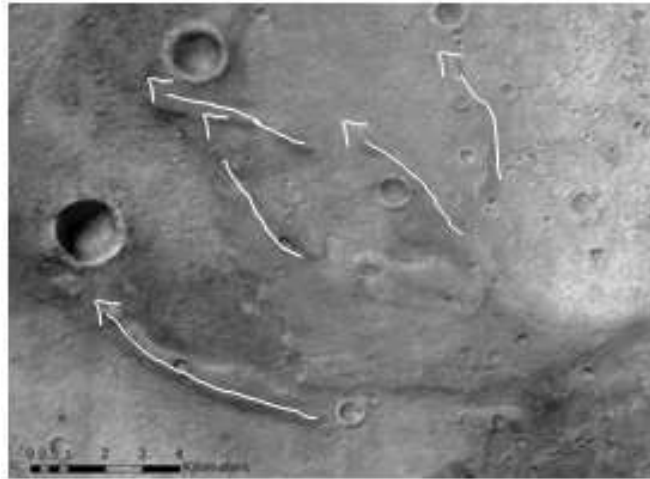
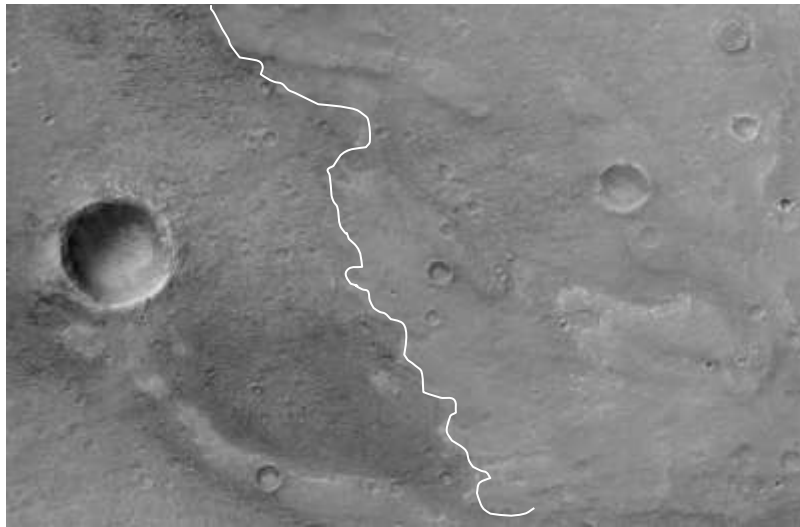


Figura 5.18 Delta en el sector 3. Tomado de Quantin et al, (2014)



*Figura 5.19 Delta en el sector 3 comparado con el delta localizado en la región nombrada Eberswalde 24.3°S, 33.5°W*

### *5.5.1 Resultados para el sector 3*

El hecho de tener canales de desbordamiento implica la presencia de agua líquida en el pasado en cantidades colosales durante el período Hesperiano-Amazoniano (2.3 - 3.7 Ga).

Los canales invertidos que se observan son el resultado de procesos erosivos, lo cual sucede cuando el piso del canal, o el material de relleno del canal, es más difícil de erosionar que el material circundante. También puede tratarse de depósitos glaciares.

Si se confirmara la existencia de un delta sería el indicador más fuerte de que Marte alguna vez tuvo lagos.

# 6 | Discusión y conclusión

En los tres sectores analizados es evidente que el agua líquida estuvo presente en la superficie marciana en algún momento de su historia. El agua tuvo tiempo suficiente como para crear canales de grandes dimensiones y el posible delta detectado.

La presencia de filosilicatos implica que el agua interactuó con rocas antiguas del periodo Noachiano. El hecho de que toda el área de las elipses de aterrizaje este cubierta de estos minerales sugiere que un gran caudal de agua debió pasar por las rocas y el suelo.

Según Ehlmann et al. (2011) los filosilicatos en Marte se formaron a temperaturas relativamente bajas unos 100 a 200°C. La superficie marciana era húmeda y templada.

Los canales y las morfologías invertidas son evidencia clave e inequívoca de que algunos valles en el Marte primitivo llevaban flujos persistentes de agua durante periodos considerables de tiempo. La forma tan peculiar que aparece en el sector 3, que pudo haber sido un delta real, sería un indicador muy fuerte de que hubo lagos en la región.

Oxia Planum es un sitio interesante ya que contiene rocas y geoformas que abarcan toda la historia del planeta desde el Noachiano hasta el Amazoniano. Se tienen alteraciones, valles fluviales y canales del noachiano; un depósito acuoso, posiblemente un delta, de edad hesperiana; un flujo de lava amazónica y una continua erosión durante el Hesperiano y el Amazoniano.

## *6.1 Posibilidades de encontrar evidencias de vida presente o pasada en Oxia Planum*

Si bien se pudo confirmar la existencia de cuerpos de agua líquida en la región, el problema es saber cuánto tiempo pudieron durar y si este tiempo fue suficiente para generar vida.

Tomando como ejemplo a la Tierra, sabemos que los fósiles más antiguos encontrados en el Cratón de Pilbara, Australia Occidental, tienen edades de 3.49 y 3.46 Ga. Según Oberbeck & Fogleman (1989) justo antes de 3.5 Ga ocurrieron impactos que interrumpieron la química prebiótica, vaporizaban los océanos y esterilizaban los planetas, por lo tanto, ellos calculan que la vida se originó durante un periodo de 67 a 133 millones de años.

Considerando estos datos, los cuerpos de agua en Oxia Planum debieron tener una duración de un mínimo de 67 millones de años. Es un dato esperanzador considerando que tenemos exposiciones de filosilicatos que datan del Noachiano (~3.9 Ga) y un posible delta con una edad aproximada de 3.7 Ga esto quiere decir que entre estos dos eventos existe una diferencia de edad de 200 millones de años, tiempo suficiente para originar vida.

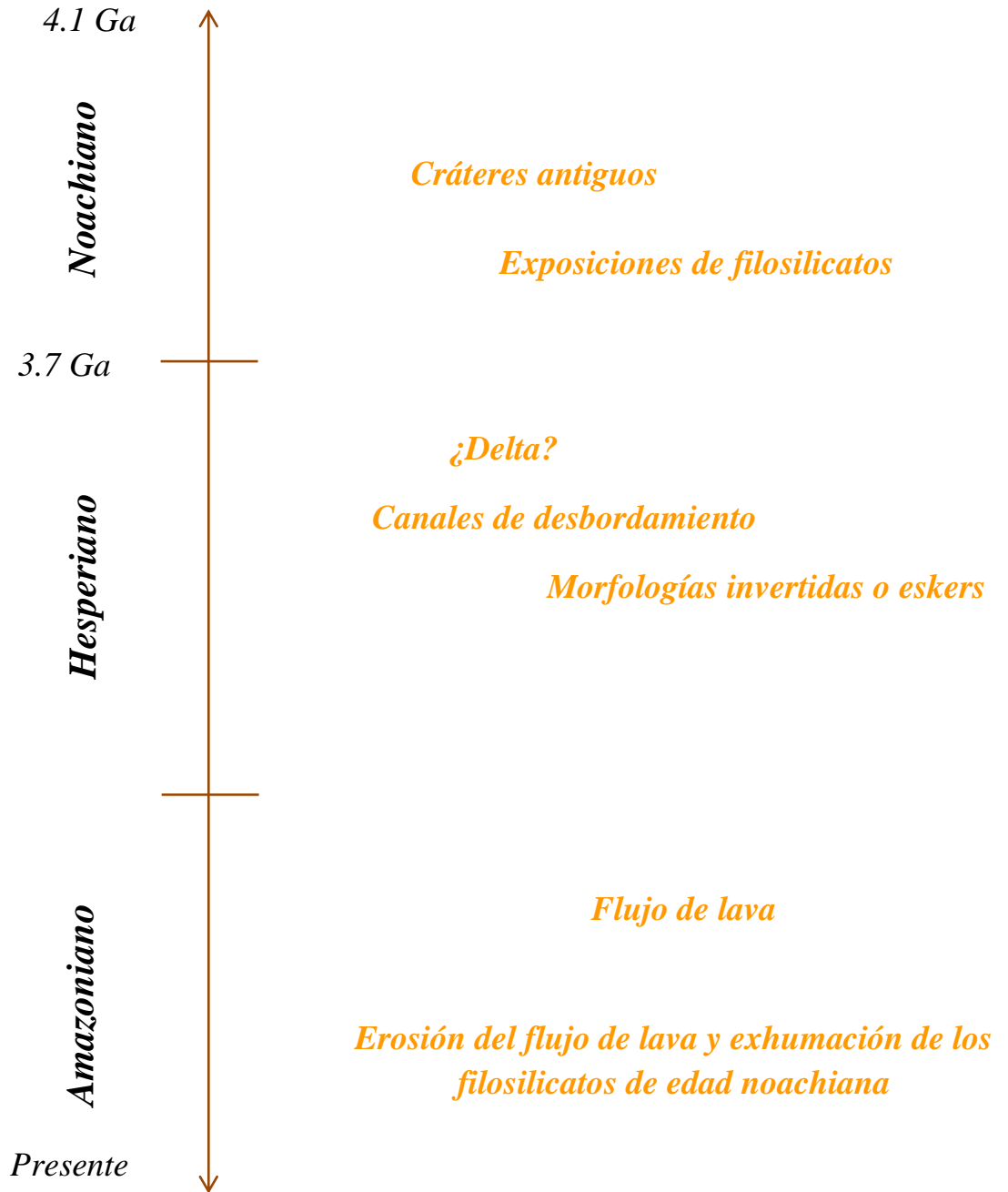
Es cierto que para considerar un ambiente habitable se necesitan más elementos como una temperatura adecuada, pH neutro, salinidad específica, etc. Pero es un gran avance tener evidencias claras de agua líquida actuando en el pasado de Marte.

## *6.2 Ruta sugerida para ExoMars 2020*

Se sugieren 8 lugares de interés para que el Rover ExoMars 2020 realice perforaciones en el lugar de aterrizaje (Figura 6.1). Los puntos abarcan toda la historia geológica de Oxia Planum, iniciando en terrenos de edad noachiana, después hesperiana y concluir las perforaciones en terrenos del Amazoniano para así determinar cómo ha evolucionado la zona.

Las perforaciones pueden ser en las zonas que presenten arcillas debido a que son excelentes para preservar materia orgánica. Hay posibilidades de que su química este preservada en el delta o en los canales que es donde las cantidades de agua líquida debieron ser mayores.

*Historia Geológica de Oxia Planum*





La parte dentro del rectángulo es en la que se debe prestar mayor atención debido a que, si hay evidencias de vida, podrían estar en esa zona. El recorrido podría comenzarse de las zonas más antiguas de edad Noachiano y finalizar con las más recientes del Amazoniano.

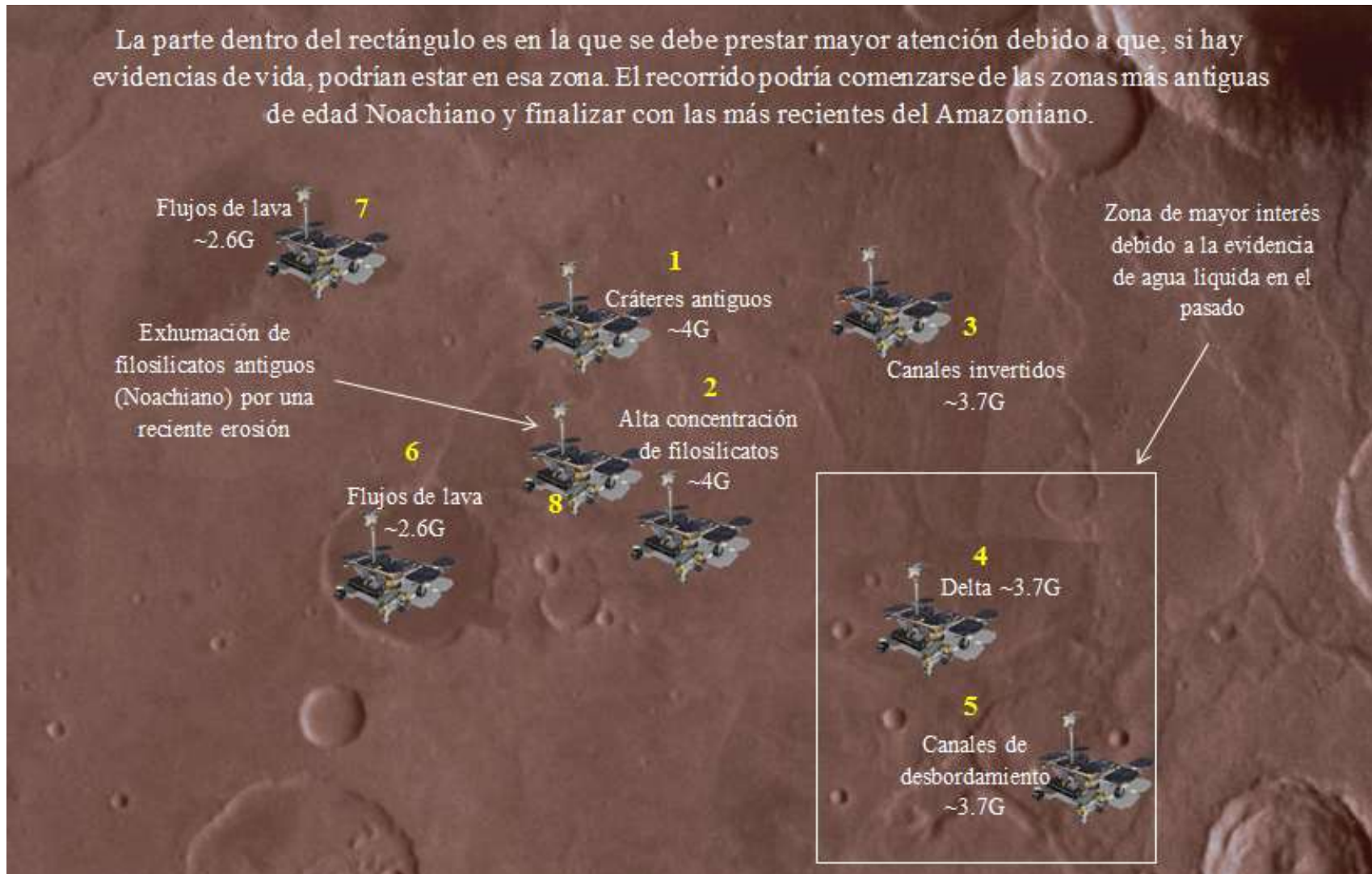


Figura 6.1 Ruta sugerida para ExoMars 2020.

### 6.3 Conclusiones

Las evidencias geológicas visibles en la superficie que comprenden las elipses de aterrizaje para Oxia Planum indican un pasado acuoso y con grandes posibilidades para conservar algún rastro de actividad biológica.

1. Capas de filosilicatos (vermiculita, montmorillonita, nontronita, saponita) cubren todo el área de las elipses de aterrizaje, indicando una alteración hídrica.
2. Se presentan canales invertidos y canales de desbordamiento que fueron esculpidos por agua líquida.
3. Todo indica la presencia de un delta que tuvo su origen en el Hesperiano (~3.7 Ga).
4. Recientes flujos de lava cubrieron partes de la zona pero la erosión ha exhumado depósitos antiguos que pueden tener algunas biofirmas.
5. Marte hoy es un planeta hostil con una atmósfera demasiado delgada que lo hace imposible de albergar cualquier forma de vida, debajo de la superficie y protegidas de la radiación constante del Sol, podrían hallarse algún tipo de forma de vida presente o pasada.
6. La Misión ExoMars como una de las más ambiciosas en la historia, el hecho de perforar 2 metros bajo el subsuelo es algo sin precedentes y de haber alguna forma de vida, ya sea como fósil o como forma actual, debe estar protegida de las condiciones extremas del planeta.

## Referencias

- Anguita F. (1998). *Historia de Marte. Mito, exploración, futuro*. Barcelona, España: Planeta.
- Baker, V.R. (2006) *Geomorphological Evidence for Water on Mars*. *Elements* 2: 139-143.
- Cabrol, N.A., Grin, E.A., (2003) *Overview on the formation of paleolakes and ponds on Mars*. *Global and Planetary Change* 35: 199-219.
- Carr, M.H., Head III, J.W. (2009) *Geologic history of Mars*. *Earth and Planetary Science Letters* 294: 185-203.
- Clifford, S.M., Lasue, J., Heggy, E., Boisson, J., McGovern, P., 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* 115: 1-17.
- Clifford, S.M., Parker, T.J. (2001) *The Evolution of the Martian Hydrosphere: Implications for the Fate of a Primordial Ocean and the Current State of the Northern Plains*. *Icarus* 154: 40-79.
- Corbett, G.J., Leach, T.M. (1998). *Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems : Structure, Alteration, and Mineralization*. Society of Economic Geologist, Special Publication 6: 1-237
- Cousins, C.R., Gunn, M., Prosser, B.J., Barnes, D.P., Crawford, I.A., Griffiths, A.D., Davis, L.E., Coates, A.J. (2012). *Selecting the geology filter wavelengths for the ExoMars Panoramic Camera instrument*. *Planetary and Space Science* 71: 80-100.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., (1996) *The rock forming minerals*. England: Longman.
- Di Achille, G., Hynek, B.M. (2010) *Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys*. *Nature Geoscience* 3: 459-463.

Ehlmann, B.L., Mustard, J.F., Murchie, S.L., Bibring, J.P., Meunier, A., Fraeman, A.A., Langevin, Y. (2011) *Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars*. Nature 479: 53-60.

Fairén, A.G., Dohm, J.M., Baker, V.R., de Pablo, M.A., Ruiz, J., Ferris, J.C., Anderson, R.C. (2003) *Episodic flood inundations of the northern plains of Mars*. Icarus 165: 53-67.

Golabek, G.J., Keller, T., Gerya, T.V., Zhu, G., Tackley, P.J., Connolly, J.A.D. (2011) *Origin of the martian dichotomy and Tharsis from a giant impact causing massive magmatism*. Icarus 215: 346-357.

Gutiérrez-Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Madrid, España: Pearson Prentice Hall.

Hartmann, W.K. (2003). *Los misteriosos paisajes del planeta rojo*. Madrid, España: Akal.

Karlsoon, B.N., Schmidt, L.S., Hvidberg, C.S. (2015). *Volume of Martian midlatitude glaciers from radar observations and ice flow modeling*. Geophysical Research Letters 42: 2627-2633

Marinova, M.M., Aharonson, O., Asphaug, E. (2008). *Mega-impact formation of the Mars hemispheric dichotomy*. Nature 453: 1216-1219

McGovern, P.J., Neumann, G.A., Phillips, R.J., Smith, D.E., Zuber, M.T. (2005) *New Perspectives on Ancient Mars*. Science 307: 1214-1220.

McKay, C.P., Davis, W.L. (1991) *Duration of liquid water habitats on early Mars*. Icarus 90: 214-221.

Neumann, G.A., Zuber, M.T., Wieczorek, M.A., McGovern, P.J., Lemoine, F.G. Smith, D.E. (2004) *Crustal structure of Mars from gravity and topography*. Journal of Geophysical Research 109: 1-18.

Nimmo, F., Tanaka, K. (2005) *Early crustal evolution of Mars*. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 33: 133-161.

Oberbeck, V.R., Fogleman, G. (1989) *Estimates of the maximum time required to originate life*. Origins of life and evolution of biosphere 19: 549-560.

- Pain, C.F., Clarke, J.D.A., Thomas, M. (2007) *Inversion of relief on Mars*. *Icarus* 190: 478-491.
- Parker, T.J., Currey, D.R. (2001) *Extraterrestrial coastal geomorphology*. *Geomorphology* 37: 303-328.
- Pelkey, S.M., Mustard, F., Murchie, S., Clancy, R.T., Wolff, M., Smith, M., Milliken, R., Bibring, J.P., Gendrin, A., Poulet, F., Langevin, Y., Gondet, B. (2007) *CRISM multispectral summary products: Parameterizing mineral diversity on Mars from reflectance*. *Journal of Geophysical Research* 112: 1-18.
- Pereira, D., Bárcena, M.A., Rubio, I., Sesma, J., Anguita, F., De Pablo, M.A., López-Valverde, M.A., Hueso-Alonso, R., Márquez, A., Montoya, I., Nieto, A.B., Benito, G., López Ruiz-Labranderas, I., Prieto-Ballesteros, O., Ruiz, J., Ormo, J., Díaz- Martínez, E., Martín-Escorza, C., Llorca, J., Casanova, I., Diego-Rasilla, F.J., Barceló, M. (2004). *Aproximación a las ciencias planetarias*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- Solomon, S.C., Aharonson, O., Aurnou, J.M., Banerdt, W.B., Carr, M.H., Dombard, A.J., Frey, H.V., Golombek, M.P., Hauck II, S.A., Head III, J.W., Jakosky, B.M., Johnson, C.L., McGovern, P.J., Neumann, G.A., Phillips, R.J., Smith, D.E., Zuber, M.T. (2005) *New Perspectives on Ancient Mars*. *Science* 307: 1214- 1220.
- Tanaka, K. (1986) *The stratigraphy of Mars*. *Journal of Geophysical Research* 91: 139-158.
- Tanaka, K., Robbins, S.J., Fortezzo, C.M., Skinner Jr, J.A., Hare, T.M. (2014) *The digital global geologic map of Mars: Chronostratigraphic ages, topographic and crater morphologic characteristics, and updated resurfacing history*. *Planetary and Space Science* 95: 11-24.
- Villanueva , G.L., Mumma, M.J., Novak, R. E., Kaufl, H.U., Hartogh, P., Encrenaz, T., Tokunaga, A., Khayat, A., Smith, M.D. (2015) *Strong water isotopic anomalies in the martian atmosphere: Probing current and ancient reservoirs*. *Scienceexpress*.

Wyatt, M.B., McSween Jr, H.Y., Moersch, J.E., Christensen, P. R. (2003) *Analysis of surface compositions in the Oxia Palus region on Mars from Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer Observations*. Journal of Geophysical Research 108: 1-16.

Westall F., Edwards H. G., Whyte L. A. Fairén G, Bibring J.-P, Bridges J., Hauber E. Ori G. G., Werner S., Loizeau, Kuzmin R., Williams R. M. E., Flahaut J., Forget F, Vago J. L., Rodionov D., Korablev O. Witasse O., Kminek G, Lorenzoni L., Bayle O., Joudrier L. Mikhailov V., Zashirinsky A., Alexashkin S., Calantropio F., Merlo A. (2014) *Recommendation for the Narrowing of ExoMars 2018 Landing Sites*. ESA: 1-75.

Zuber, M.T. (2001) *The crust and mantle of Mars*. Nature 412: 220-227.

### *Referencias electrónicas*

ESA. (2014). robotic exploration of Mars. Noviembre 2015, de European Space Agency  
Sitio web: <http://exploration.esa.int/mars/>

European Southern Observatory, (2015) Marte: el planeta que perdió vastos océanos de agua. ESO. Sitio web: <https://www.eso.org/public/spain/news/eso1509/>

Mark Torrence . (2007). The Mars Orbiter Laser Altimeter. Noviembre 2015, de NASA  
Sitio web: [http://mola.gsfc.nasa.gov/images/topo\\_labeled.jpg](http://mola.gsfc.nasa.gov/images/topo_labeled.jpg)

Mercedes Domínguez Díaz . (2016). Estudio de la morfometría en los canales de Marte. Mayo 2016, de Academia Sitio web:  
[http://www.academia.edu/9196304/Presentaci%C3%B3n\\_Morfometr%C3%ADa\\_en\\_los\\_canales\\_de\\_Marte](http://www.academia.edu/9196304/Presentaci%C3%B3n_Morfometr%C3%ADa_en_los_canales_de_Marte)

NASA. (2014). Mars Exploration. Enero 2016, de Jet Propulsion Laboratory NASA Sitio web: <http://www.jpl.nasa.gov/>

Peter H. Smith. (2015). Mars/Earth Comparison Table. Noviembre 2015, de NASA Sitio web: <http://phoenix.lpl.arizona.edu/mars111.php>

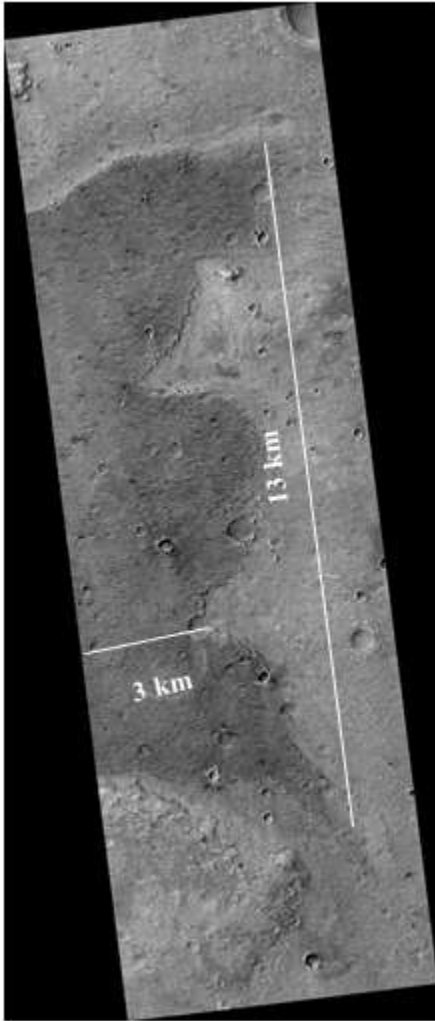
The Planetary Society. (2015). Pictures of Mars and its moons. Noviembre 2015, de The Planetary Society Sitio web: <http://www.planetary.org/>

### *Presentaciones consultadas*

Quantin, C., Carter, J., Thollot, P., Broyer, J., Lozach, L., Davis, J., Grindrod, P., Pajola, M., Baratti, E., Sandro, R., Mangili, C., Allemand, P., Bultel, B., Leyrat, C., Ody, A., Fernando, J. (2014) *Oxia Planum*. First Landing Site Selection Workshop. ESA

Quantin, C., Carter, J., Thollot, P., Lozach, L., Davis, J., Grindrod, P., Pajola, M., Baratti, E., Sandro, R., Mangili, C., Allemand, P., Bultel, B., Leyrat, C., Ody, A., Fernando, J. (2015) *Oxia Planum, Probing ancient alteration and subaqueous activity*. Third Landing Site Selection Workshop. ESA

*Apéndice 1. Imágenes obtenidas por HiRISE*

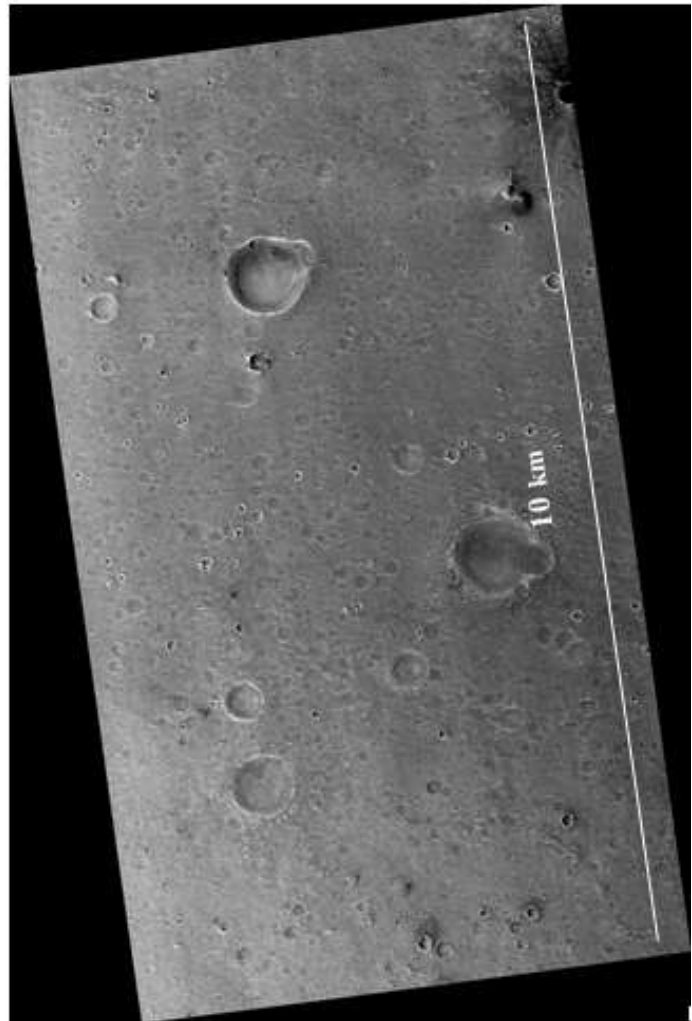


**Nombre:** PSP\_009880\_1985

**Resolución:** 0.25 metros/ pixel

**Ubicación:** 18.20°N 335.48°E

[http://hirise.lpl.arizona.edu/PSP\\_009880\\_1985](http://hirise.lpl.arizona.edu/PSP_009880_1985)



**Nombre:** PSP\_003195\_1985

**Resolución:** 0.25 metros/ pixel

**Ubicación:** 18.24°N 335.85°E

[http://hirise.lpl.arizona.edu/PSP\\_003195\\_1985](http://hirise.lpl.arizona.edu/PSP_003195_1985)



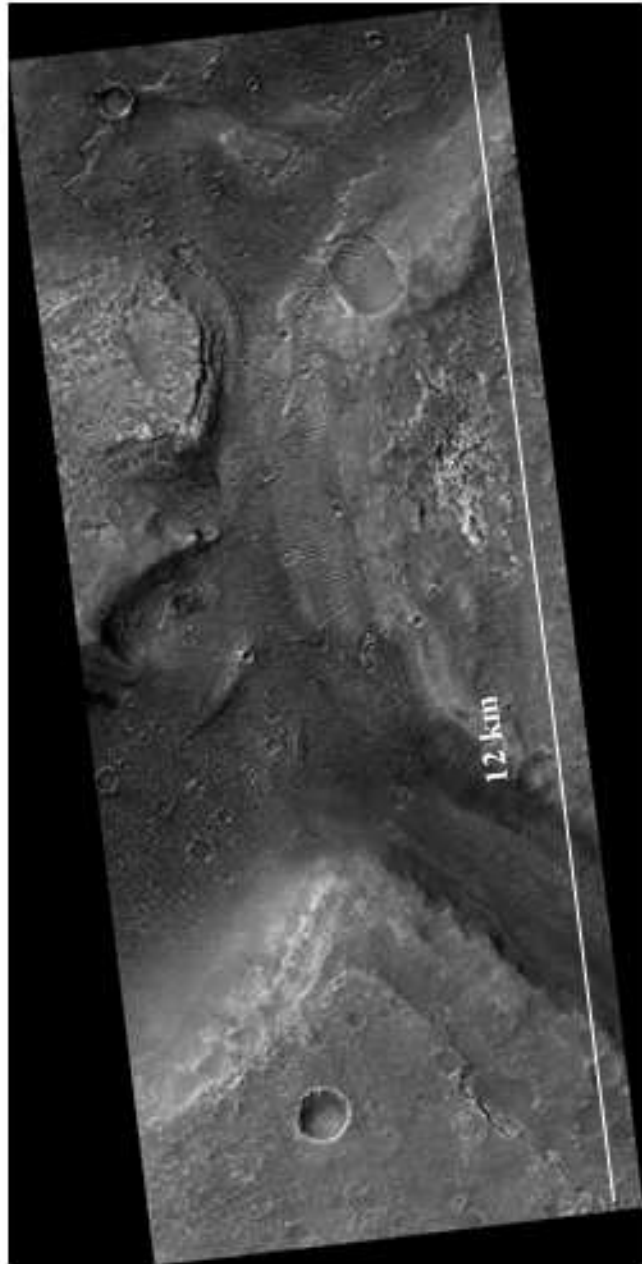


**Nombre:** ESP\_037136\_1985

**Resolución:** 0.25 metros/ pixel

**Ubicación:** 18.15°N 336.05°E

[http://hirise.lpl.arizona.edu/ESP\\_037136\\_1985](http://hirise.lpl.arizona.edu/ESP_037136_1985)



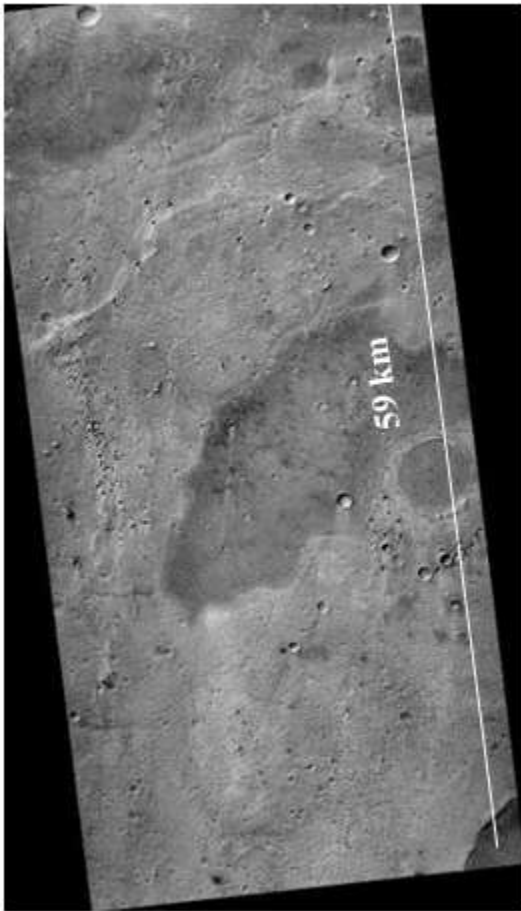
**Nombre:** ESP\_037703\_1980

**Resolución:** 0.25 metros/ pixel

**Ubicación:** 17.67°N 336.18°E

[http://hirise.lpl.arizona.edu/ESP\\_037703\\_1980](http://hirise.lpl.arizona.edu/ESP_037703_1980)

*Apéndice 2. Imágenes obtenidas por CTX*

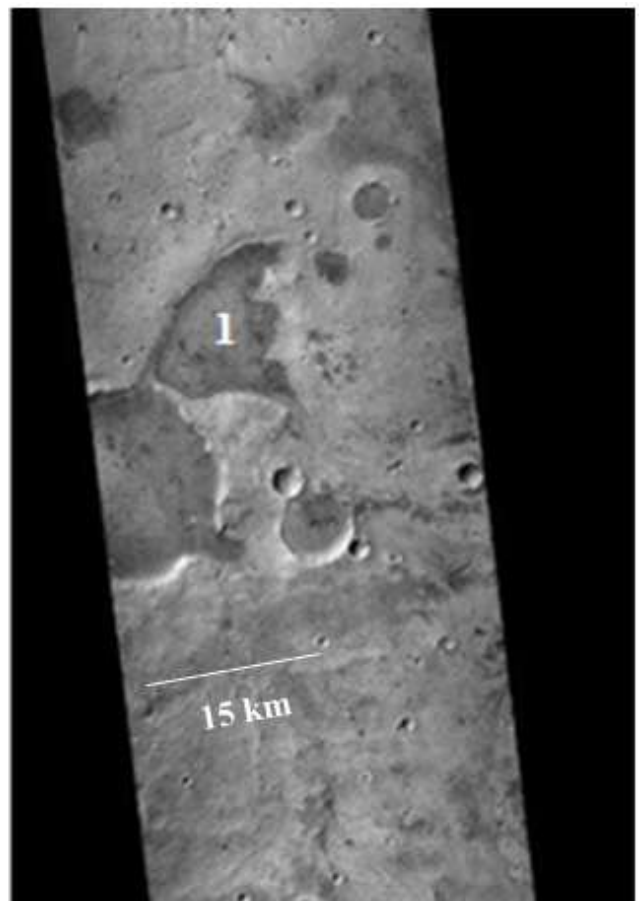


**Nombre:**  
F20\_043690\_1986\_XN\_18N025W

**Resolución:** 6 metros/ pixel

**Ubicación:** 18.51°N 334.89°E

[http://viewer.mars.asu.edu/planetview/inst/ctx/F20\\_043690\\_1986\\_XN\\_18N025W#P=F20\\_043690\\_1986\\_XN\\_18N025W&T=2](http://viewer.mars.asu.edu/planetview/inst/ctx/F20_043690_1986_XN_18N025W#P=F20_043690_1986_XN_18N025W&T=2)

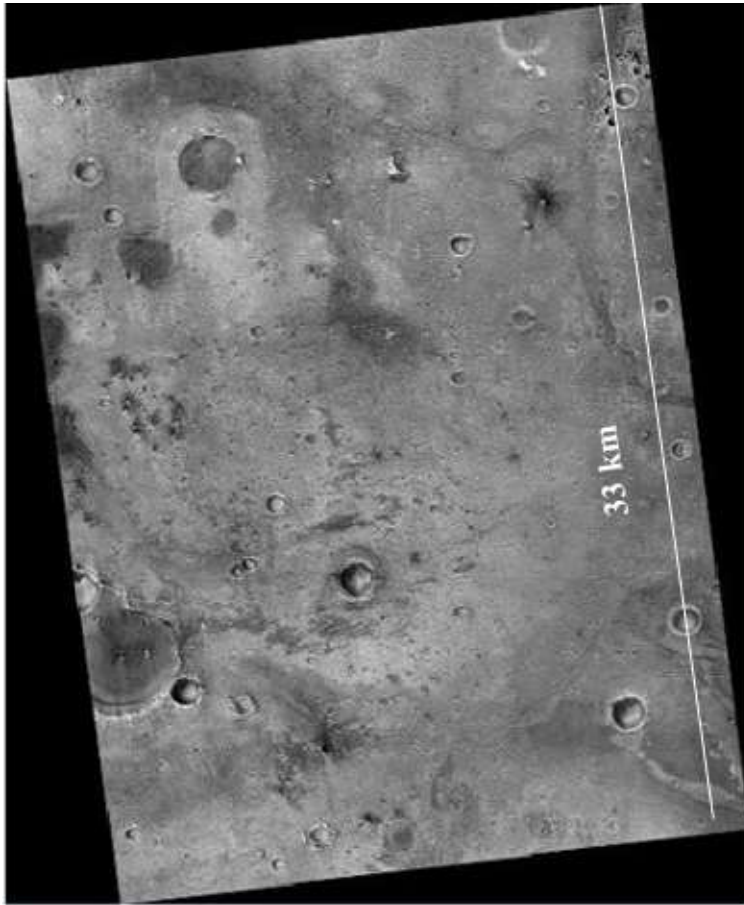


**Nombre:**  
P22\_009735\_1977\_XN\_17N024W

**Resolución:** 6 metros/ pixel

**Ubicación:** 17.60°N 335.54°

[http://viewer.mars.asu.edu/planetview/inst/ctx/P22\\_009735\\_1977\\_XN\\_17N024W#P=P22\\_009735\\_1977\\_XN\\_17N024W&T=2](http://viewer.mars.asu.edu/planetview/inst/ctx/P22_009735_1977_XN_17N024W#P=P22_009735_1977_XN_17N024W&T=2)



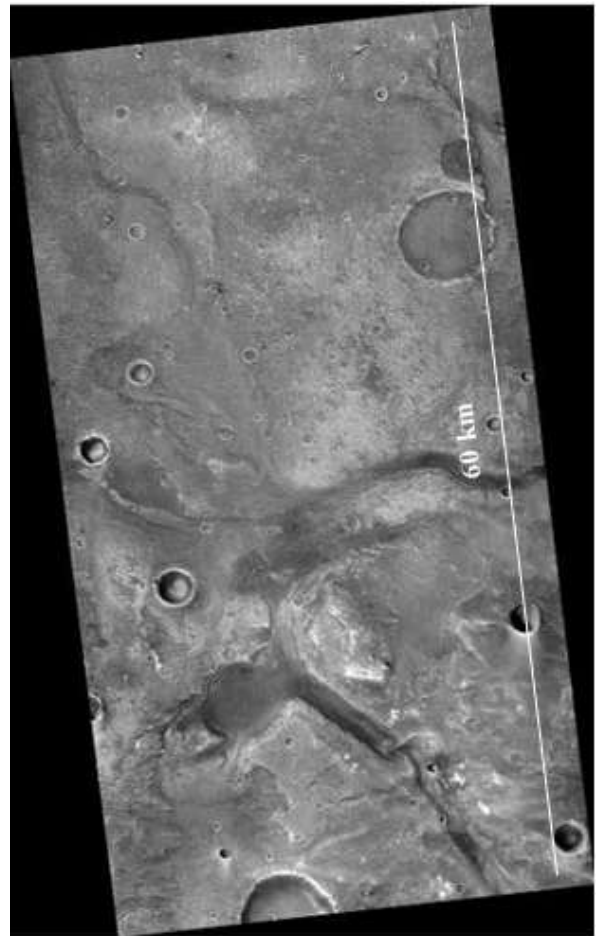
**Nombre:**

F12\_040433\_1983\_XN\_18N024W

**Resolución:** 6 metros/ pixel

**Ubicación:** 18.12°N 335.78°

[http://viewer.mars.asu.edu/planetview/inst/ctx/F12\\_040433\\_1983\\_XN\\_18N024W#P=F12\\_040433\\_1983\\_XN\\_18N024W&T=2](http://viewer.mars.asu.edu/planetview/inst/ctx/F12_040433_1983_XN_18N024W#P=F12_040433_1983_XN_18N024W&T=2)



**Nombre:**

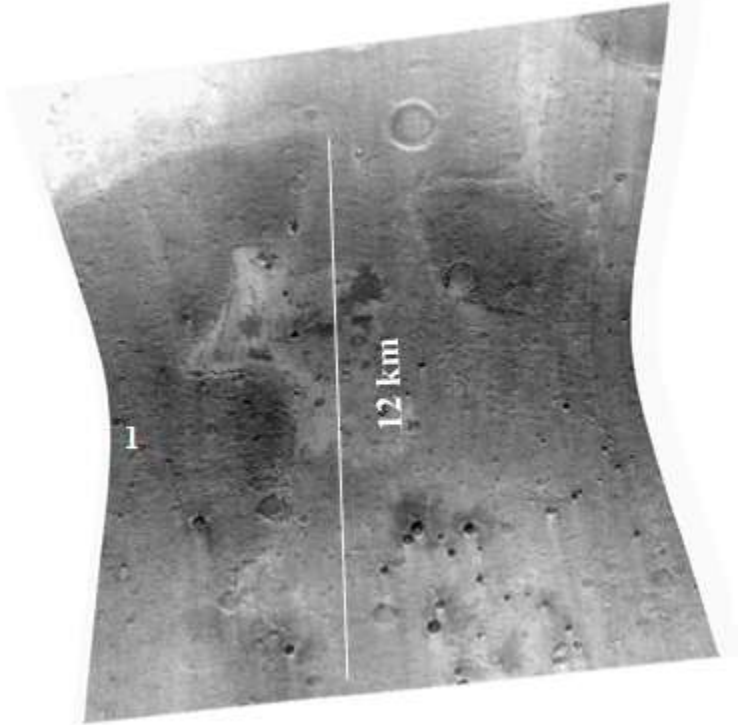
F10\_039721\_1980\_XN\_18N023W

**Resolución:** 6 metros/ pixel

**Ubicación:** 17.87°N 336.18°E

[http://viewer.mars.asu.edu/planetview/inst/ctx/F10\\_039721\\_1980\\_XN\\_18N023W#P=F10\\_039721\\_1980\\_XN\\_18N023W&T=2](http://viewer.mars.asu.edu/planetview/inst/ctx/F10_039721_1980_XN_18N023W#P=F10_039721_1980_XN_18N023W&T=2)

### Apéndice 3. Imágenes obtenidas por CRISM

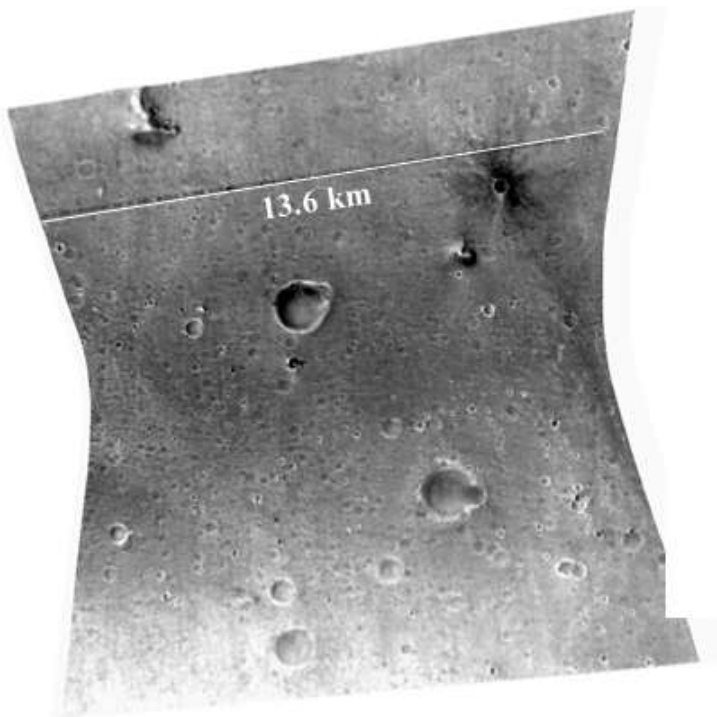


**Nombre:**  
FRT0000810D\_07\_IF166L\_TRR3.LBL

**Resolución:** 15-19 metros/pixel

**Ubicación:** 18.24°N 335.53°E

<http://crism-map.jhuapl.edu/summary.php?obs=FRT0000810D07IF166L&x=-24.47&y=18.24>

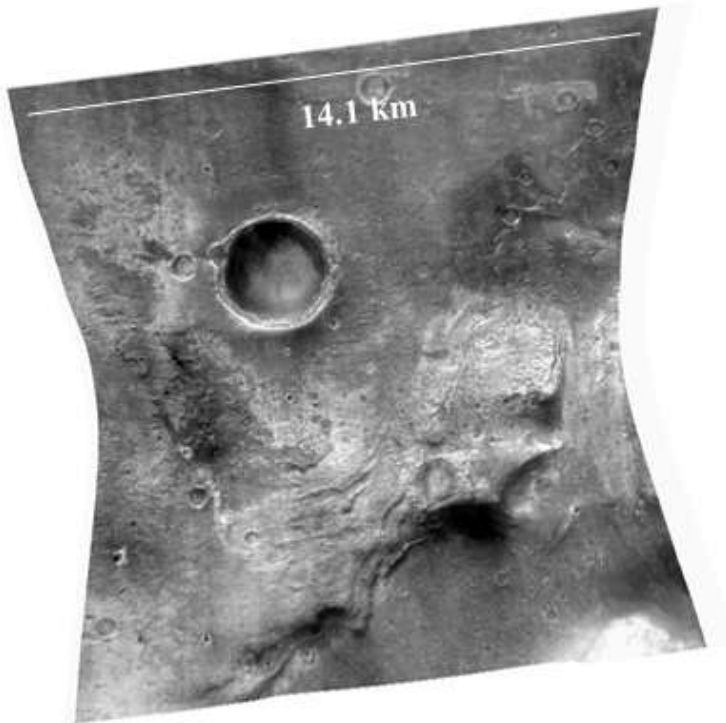


**Nombre:**  
FRT00004686\_07\_IF166L\_TRR3.LBL

**Resolución:** 15-19 metros/pixel

**Ubicación:** 18.27°N 335.86°E

<http://crism-map.jhuapl.edu/summary.php?obs=FRT0000468607IF166L&x=-24.14&y=18.28>



**Nombre:**

FRT00009A16\_07\_IF166L\_TRR3.LBL

**Resolución:** 15-19 metros/pixel

**Ubicación:** 17.72°N 336.10°E

<http://crism-map.jhuapl.edu/summary.php?obs=FRT00009A1607IF166L&x=-23.90&y=17.72>

*Apéndice 4. Parámetros espectrales de CRISM*

<i>Nombre</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Resultado</i>
BD530	0.53µm	Minerales férricos cristalinos
SH600	0.60 µm	Minerales férricos
BDI1000	1 µm	Minerales de Fe
OLINDEX	Índice de olivino	Índice positivo= fayalita
LCPINDEX	Índice de piroxeno	Piroxeno
HCPINDEX	Índice de piroxeno	Piroxeno
BD2300	2.3 µm	Minerales hidratados, en particular filosilicatos
BD2210	2.21 µm	Minerales Al-OH
BD1900	1.9 µm	H <sub>2</sub> O
SINDEX	3.9 µm	Carbonatos
BD2100	2.1 µm	Minerales monohidratados
BD1500	1.5 µm	Hielo de H <sub>2</sub> O
BD1435	1.435µm	Hielo de CO <sub>2</sub>

*Tabla 7.1 Parámetros espectrales detectados por CRISM en los tres sectores analizados. Modificada de Pelkey, S.M. et al. 2007.*

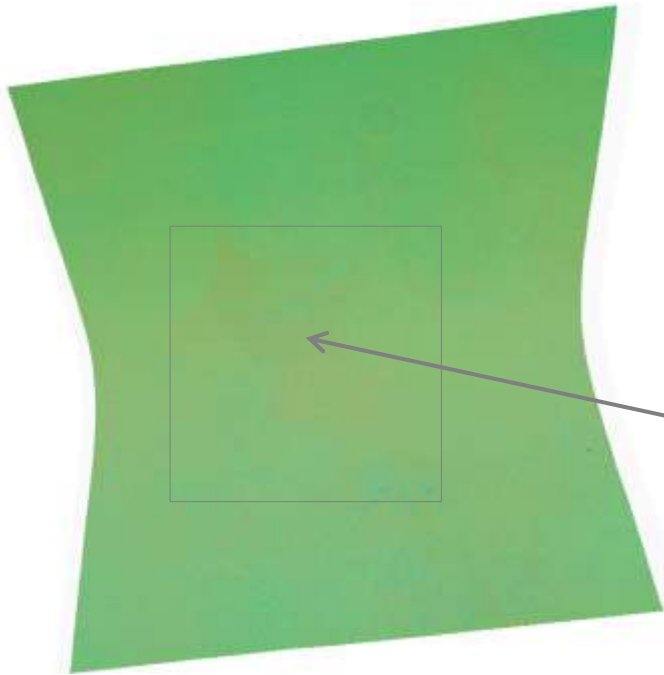
*Apéndice 4.1 Parámetros espectrales de CRISM para el sector 1*

*Rojo = BD530 (minerales férricos)*

*Verde = SH600 nm (revestimientos)*

*Azul = BDI1000nm (variedad de minerales de hierro)*

*Datos CRISM, Minerales de hierro oxidados*



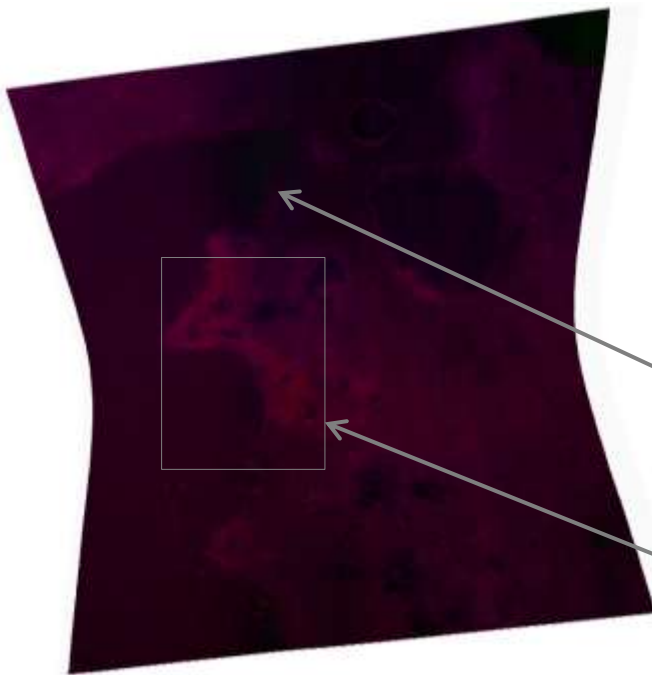
Se aprecia una ligera firma color rojo lo que indica poca presencia de minerales férricos y la mayoría son revestimientos.

*Rojo = OLINDEX (olivino o filosilicatos de hierro)*

*Verde = LCPINDEX (bajo Ca piroxeno)*

*Azul = HCP ÍNDICE (piroxeno alto en Ca)*

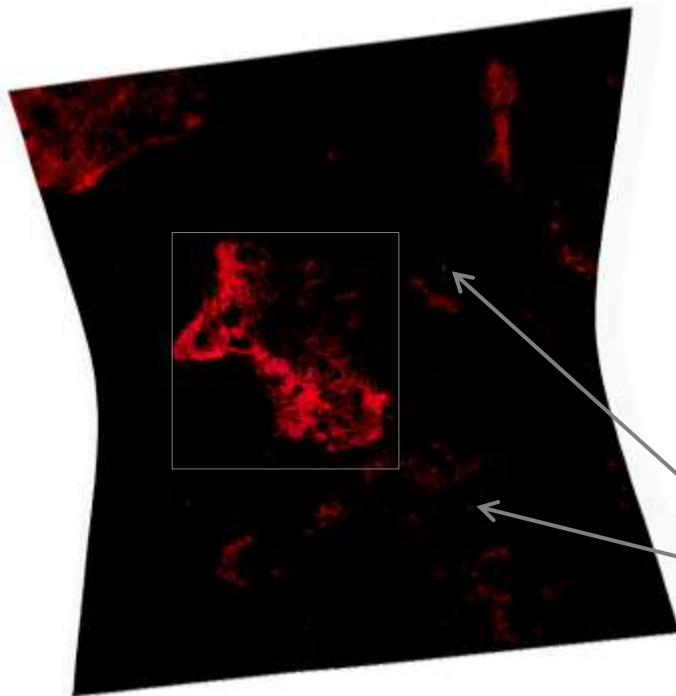
*Datos CRISM, Minerales máficos*



Piroxeno bajo en calcio

Nótese ligeras firmas de olivinos y piroxeno cálcico





**Rojo = BD2300 (filosilicatos Fe / Mg)**

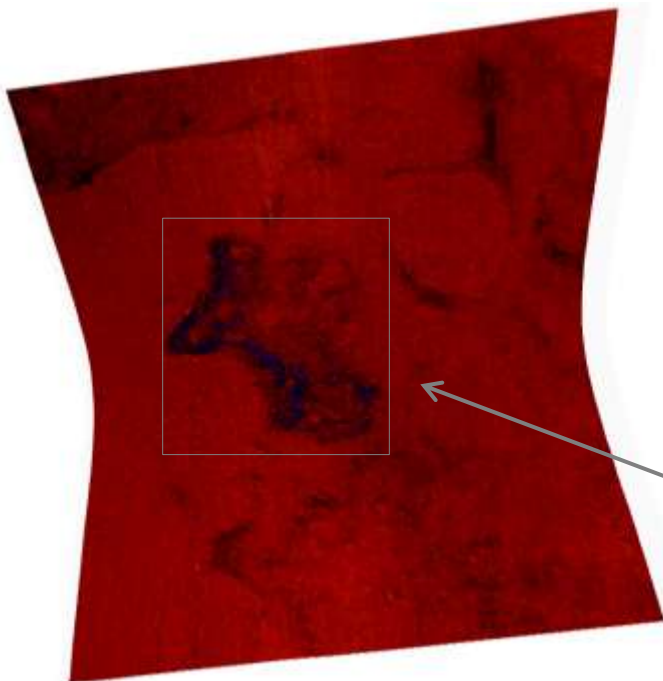
**Verde = BD2210 (filosilicatos Al hidratados o vidrio)**

**Azul = BD 1900 (sulfatos hidratados, arcillas, vidrio o hielo de agua)**

**Datos CRISM, Silicatos hidroxilos**

Observamos una alta concentración en filosilicatos de Fe/Mg en la zona de menor elevación de los perfiles (Figura 6.3 y 6.4)

Filosilicatos de Al o vidrio son apenas perceptibles



**Rojo = SINDEXT (minerales que contienen agua o hielo de agua)**

**Verde BD2100= (sulfatos monohidratados o hielo de agua)**

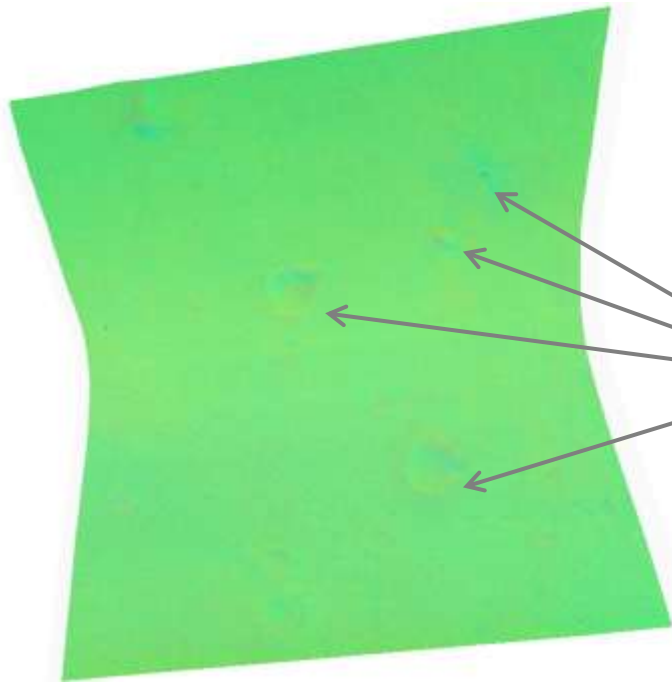
**Azul = BD1900nm. (Sulfatos hidratados, arcillas, vidrio, o hielo de agua)**

**Datos CRISM, Agua**

En ésta área se nota una alta concentración en sulfatos hidratados y/o arcillas, y nula presencia de hielo de agua



Apéndice 4.2 Parámetros espectrales de CRISM para el sector 2



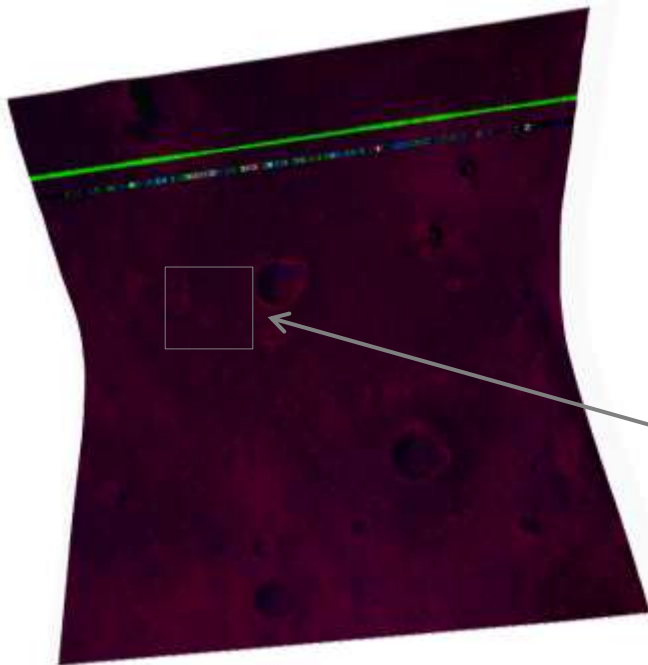
*Rojo = BD530 (minerales férricos)*

*Verde = SH600 nm (revestimientos)*

*Azul = BD1100nm (variedad de minerales de hierro)*

*Datos CRISM, Minerales de hierro oxidados*

En los cráteres es posible observar algunas firmas muy ligeras de minerales de hierro



*Rojo = OLINDEX (olivino o filosilicatos de hierro)*

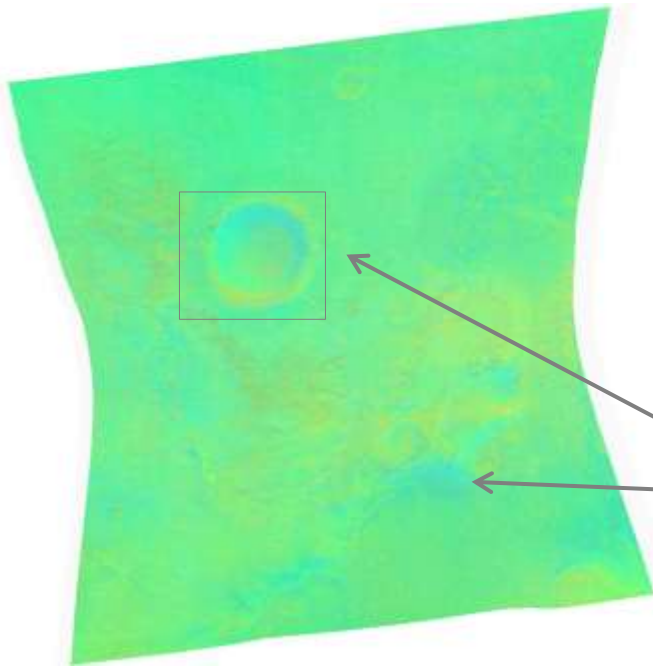
*Verde = LCPINDEX (bajo Ca piroxeno)*

*Azul = HCP ÍNDICE (piroxeno alto en Ca)*

*Datos CRISM, Minerales máficos*

Olivino o filosilicatos de hierro se aprecian un poco en la región que rodea a los cráteres.

*Apéndice 4.3 Parámetros espectrales de CRISM para el sector 3*



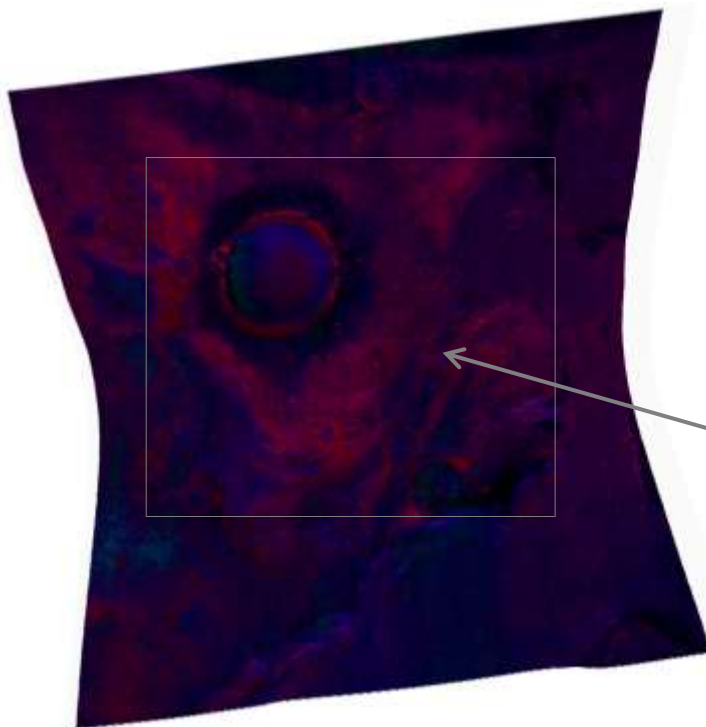
*Rojo = BD530 (minerales férricos)*

*Verde = SH600 nm (revestimientos)*

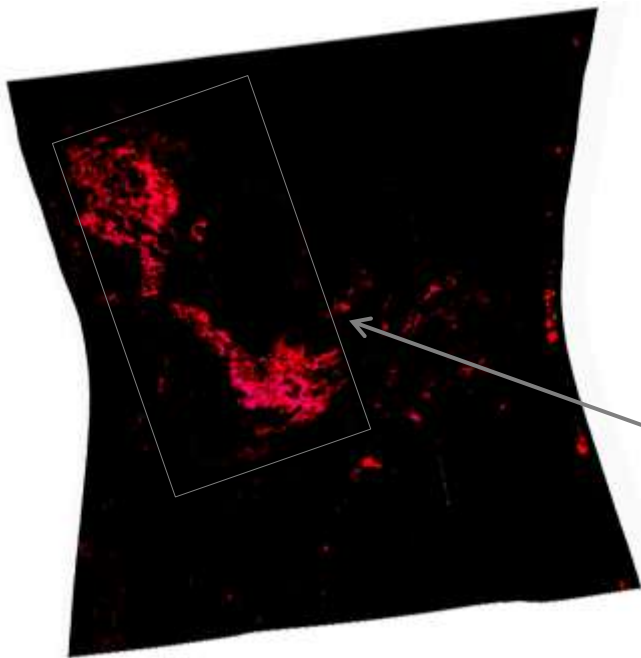
*Azul = BDI1000nm (variedad de minerales de hierro)*

*Datos CRISM, Minerales de hierro oxidados*

Poca presencia de minerales de hierro



Se observan firmas tanto de piroxeno alto en Ca como bajo en Ca, éste último en menor cantidad. Lo predominante es olivino y/o filosilicatos Fe.



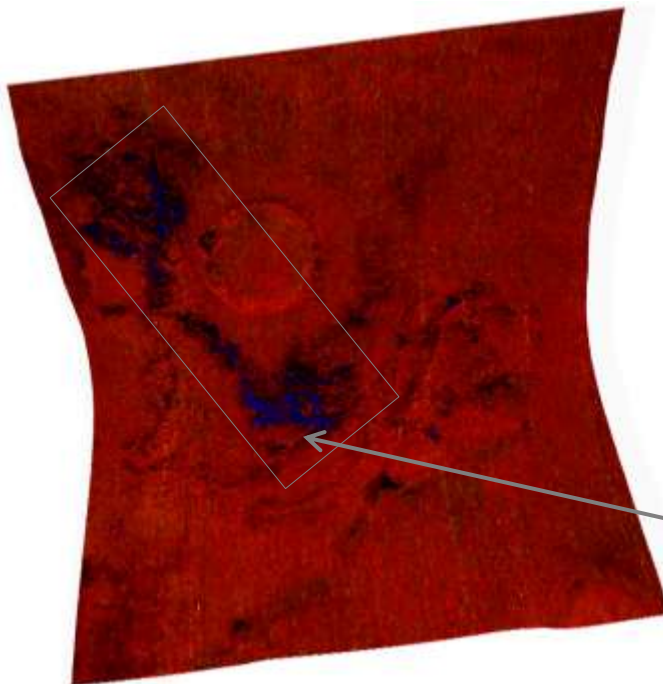
**Rojo = BD2300 (filosilicatos Fe / Mg)**

**Verde = BD2210 (filosilicatos Al hidratados o vidrio)**

**Azul = BD 1900 (sulfatos hidratados, arcillas, vidrio o hielo de agua)**

**Datos CRISM, Silicatos hidroxilos**

Alta presencia de filosilicatos Fe/Mg



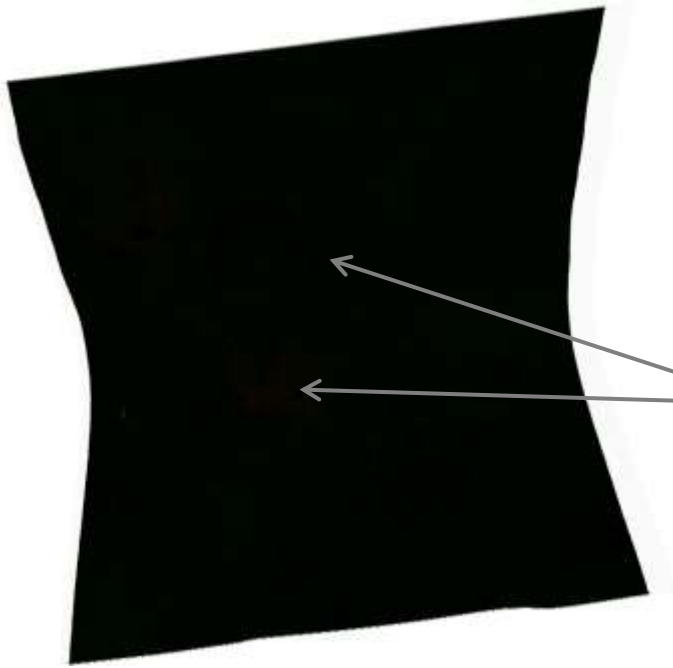
**Rojo = SINDEX (minerales que contienen agua o hielo de agua)**

**Verde BD2100= (sulfatos monohidratados o hielo de agua)**

**Azul = BD1900nm. (Sulfatos hidratados, arcillas, vidrio, o hielo de agua)**

**Datos CRISM, Agua**

Firma azul que posiblemente sea Sulfatos hidratados, arcillas, vidrio o hielo de agua



*Rojo = BD1900 (hielo de agua, sulfatos hidratados, filosilicatos o vidrio)*

*Verde BD1500= (hielo de agua)*

*Azul = BD1435 (hielo de CO<sub>2</sub>)*

*Datos CRISM, Agua y hielo de CO<sub>2</sub>*

Ligeras firmas de hielo de agua  
alrededor del cráter y un poco de lo que  
podría ser sulfatos hidratados,  
filosilicatos o vidrio

*Apéndice 5. Imágenes para ser analizadas con lentes 3D*

<i><b>Nombre</b></i>	<i><b>Instrumento</b></i>	<i><b>Escala</b></i>
ESP_036780_1985	HiRISE	0.25 metros/ pixel Ancho: 2048 pixeles = 512 m Alto: 5064 pixeles = 1266 m

<i><b>Nombre</b></i>	<i><b>Instrumento</b></i>	<i><b>Escala</b></i>
PSP_003195_1985	HiRISE	0.25 metros/ pixel Ancho: 2048 pixeles = 512 m Alto: 3924 pixeles = 981 m

<i><b>Nombre</b></i>	<i><b>Instrumento</b></i>	<i><b>Escala</b></i>
ESP_037136_1985	HiRISE	0.25 metros/ pixel Ancho: 2048 pixeles = 512 m Alto: 9317 pixeles = 2329 m











## *Glosario*

***Acreción:*** Agregación de materia a un cuerpo o planeta. Por ejemplo, la acreción de masa por una estrella es la adición de masa a la estrella a partir de materia interestelar o de una compañera.

***Acuífero:*** Formaciones geológicas en las cuales se encuentra agua y que son permeables permitiendo así el almacenamiento de agua en espacios subterráneos.

***Afelio:*** Punto más alejado del Sol en la órbita de un planeta del sistema solar.

***Afloramiento:*** Mineral o terreno que sale a la superficie.

***Andesita:*** La andesita es una roca ígnea volcánica de composición intermedia. Su composición mineral comprende generalmente plagioclasa y varios otros minerales como piroxeno, biotita y hornblenda.

***Arcilla:*** La arcilla es un silicato de aluminio hidratado, en forma de roca plástica, impermeable al agua y bajo la acción del calor se deshidrata, endureciéndose mucho.

***Basalto:*** El basalto es una roca ígnea extrusiva, sólida y negra. Es el tipo de roca más común en la corteza terrestre, y cubre la mayoría del fondo oceánico. Se forma cuando la lava llega a la superficie de la Tierra proveniente de un volcán, o de una cordillera en medio del océano.

***Biomarcador:*** Biomarcador o marcador biológico es aquella sustancia utilizada como indicador de un estado biológico.

***Biotita:*** Filosilicato de hierro y aluminio, del grupo de las micas, apareciendo como componente principal o accesorio de numerosas rocas ígneas metamórficas y sedimentarias.

***Calor geotérmico:*** Calor interno de la Tierra y que se ha concentrado en el subsuelo en lugares conocidos como reservorios geotermales, que si son bien manejados, pueden producir energía limpia de forma indefinida.

***Campo de visión:*** Porción del espacio que el ojo es capaz de ver.

**Cauce:** Parte de un valle por donde discurren las aguas en su curso

**Chassignita:** Meteorito marciano compuesto casi exclusivamente por olivino.

**Cohesión:** Unión de dos o más cuerpos.

**Cráteres de impacto:** Depresión que deja el impacto de un meteorito en la superficie de un cuerpo planetario (planeta, planeta enano, asteroide o satélite) de superficie sólida.

**Cromatógrafo de gases:** Técnica de separación y análisis de mezclas de sustancias volátiles basado en la distribución de los componentes de una mezcla entre dos fases inmiscibles, una fija y otra móvil.

**Depósito autigénico:** Formación sedimentaria que se origina por procesos diagenéticos que varían la composición química de depósitos previamente acumulados, como ocurre con los procesos desarrollados en carbonatos y dolomías

**Detrital:** Partículas de roca que derivan de la roca preexistente a través de procesos de desgaste y la erosión.

**Dinamo:** Mecanismo por el que un cuerpo celeste, como por ejemplo la Tierra, genera un campo magnético a su alrededor.

**Erosión hídrica:** Proceso de sustracción de masa sólida al suelo o a la roca de la superficie llevado a cabo por un flujo de agua que circula por la misma.

**Escorrentía superficial:** Fracción de la precipitación que circula por la superficie del terreno por torrentes, arroyos y ríos.

**Espectrómetro:** Aparato para observar los espectros, provisto de fotómetro, que determina en cada punto la intensidad relativa de las radiaciones de dos espectros luminosos.

**Espectroscopía:** Conjunto de métodos empleados para estudiar en un espectro las radiaciones de los cuerpos incandescentes.

**Espinela:** Mineral compuesto de alúmina y magnesia y teñido por óxido de hierro que cristaliza en octaedros; su color es parecido al del rubí.

**Feldespato:** Grupo de minerales tecto y aluminosilicatos que corresponden en volumen a tanto como el 60 % de la corteza terrestre. La composición de feldespatos constituyentes de rocas corresponde a un sistema ternario compuesto de ortoclasa ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) y anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ).

**Filosilicato:** Subclase de los silicatos que incluye minerales comunes en ambientes muy diversos y que presentan, como rasgo común, un hábito hojoso o escamoso derivado de la existencia de una exfoliación basal perfecta. Esto es consecuencia de la presencia en su estructura de capas de tetraedros de dimensionalidad infinita en dos direcciones del espacio.

**Fortunita:** Roca volcánica de tonos oscuros, textura holocristalina a porfídica y matriz esencialmente vítrea, según se encuentre en las zonas centrales de los afloramientos volcánicos o en la periferia. Presenta un contenido en sílice entre el 53 y el 60%.

**Gabro:** Roca ígnea plutónica compuesta principalmente de plagioclasa cálcica y piroxeno en proporciones de volumen similares.

**Geoforma:** Cuerpo tridimensional, tiene forma, tamaño, volumen y topografía, elementos que generan un relieve.

**Granate:** Nesosilicatos que tienen una fórmula general  $\text{X}_3\text{Y}_2(\text{Si O}_4)_3$ . El lugar X es usado usualmente por cationes divalentes como ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ) y el Y por cationes trivalentes como ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ).

**Jarosita:** La Jarosita pertenece al grupo de los sulfatos. Es un sulfato de potasio y hierro hidratado básico. Su origen es secundario, resultante de la meteorización de sulfuros de hierro.

**Cuenca abierta:** Descargan sus aguas fuera de la región que las delimita y llegan al mar.

**Lamproita:** Es una familia de rocas agrupadas en el término genérico de lamproítas, ricas en titanio con clinopiroxeno, anfíbol y sanidina como minerales principales, mientras que como minerales accesorios tiene apatito, espinela y también puede contener vidrio volcánico.

**Limo:** Sedimento clástico incoherente transportado en suspensión por los ríos y por el viento, que se deposita en el lecho de los cursos de agua o sobre los terrenos que han sido inundados. Para que se clasifique como tal, el diámetro de las partículas de limo varía de 0,0039 mm a 0,0625 mm.

**Majorita:** Es un silicato del tipo nesosilicato de magnesio y hierro, que como todos los del grupo de los granates cristaliza en sistema cúbico.

**Meteorito basáltico acondrítico:** Meteoritos rocosos, similares a rocas ígneas, que representan un 7,1 % de los que caen a la Tierra, y que se caracterizan por haber sufrido procesos de fusión y diferenciación en el planeta o asteroide del cual proceden. Es decir, por efecto de la temperatura se formaron magmas y los materiales más densos se situaron en el centro del cuerpo planetario, mientras que los menos densos en capas más superficiales.

**Mineraloide:** Sustancia natural, inorgánica o líquida de origen geológico, con características similares a las de los minerales, pero que no representa un auténtico mineral pues sus átomos no están ordenados.

**Moscovita:** Mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las micas alumínicas. Químicamente es un aluminosilicato de potasio y aluminio, que puede llevar magnesio, cromo y una gran variedad de otros elementos en sus numerosas variedades.

**Nakhilita:** Meteoritos marcianos que contienen minerales como sales solubles en agua, como carbonatos, fosfatos y sulfatos.

**Paleolago:** Lago antiguo.

**Peridotita:** Roca ígnea plutónica formada por lo general de olivino (peridoto) acompañados de piroxenos y anfíboles. Es muy densa y de coloración oscura. Se cree que es la roca mayoritaria en la parte superior del manto terrestre.

**Perihelio:** Punto de la órbita de un planeta más próximo al Sol.

**Perovskita:** Es un trióxido de titanio y de calcio. Es un mineral relativamente raro en la corteza terrestre. La perovskita se cristaliza en el sistema cristalino ortorrómbico.

**Piroxeno:** Los minerales del piroxeno son comunes en meteoritos y las rocas ígneas extrusivas llamadas basalto. Existen diferentes tipos de piroxeno incluyendo a la augita, wolastonita, diópsida, enstatita e hiperstena. Todos estos tipos contienen  $\text{Si}_2\text{O}_6$  pero algunos contienen sodio, mientras que otros contienen hierro (Fe), magnesio (Mg), o una combinación de estos tres elementos.

**Plagioclasa:** Conjunto de minerales que comprenden la serie albita-anortita, sección triclinica del grupo de los feldespatos, perteneciente al grupo de los tectosilicatos, que es un constituyente importante de muchas rocas.

**Redox:** Toda reacción química en la que uno o más electrones se transfieren entre los reactivos, provocando un cambio en sus estados de oxidación.

**Reflectancia:** Capacidad de un cuerpo de reflejar la luz.

**Roca básica:** Rocas ígneas pobres en cuarzo, que contienen feldespatos y que son generalmente más cálcicos que sódicos.

**Roca ultrabásica:** Rocas ígneas constituidas esencialmente por minerales ferromagnesianos, con exclusión potencial de cuarzo, feldespato y feldespatoides.

**Rover:** Vehículo espacial.

**Shergottita:** Meteorito basáltico Marciano.

**SIG:** Sistema de Información Geográfica.

**Sulfato:** Son las sales o los ésteres del ácido sulfúrico. Contienen como unidad común un átomo de azufre en el centro de un tetraedro formado por cuatro átomos de oxígeno.

**Toba:** Tipo de roca ígnea volcánica, ligera, de consistencia porosa, formada por la acumulación de cenizas u otros elementos volcánicos muy pequeños expelidos por los respiraderos durante una erupción volcánica.

