



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS Y
RECURSOS MINERALES
Curso 2022-2023**

**Estudio estructural de Sirenum Fossae:
Exploración de diques en Marte**

**Structural study of Sirenum Fossae: Dike
exploration in Mars**

PATRICIA SOLANA GONZÁLEZ

**TUTOR/ES DEL TRABAJO: IGNACIO ROMEO BRIONES
SAMUEL RIVAS-DORADO**



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS Y
RECURSOS MINERALES**

Curso 2022-2023

**Estudio estructural de Sirenum Fossae:
Exploración de diques en Marte**

**Structural study of Sirenum Fossae: Dike
exploration in Mars**

PATRICIA SOLANA GONZÁLEZ

TUTOR/ES DEL TRABAJO:

IGNACIO ROMEO BRIONES

SAMUEL RIVAS-DORADO

Fdo.:

Fdo.:



Facultad de Ciencias Geológicas Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Yo, Patricia Solana González con NIF 70274384T, estudiante de Máster Universitario en Exploración de Hidrocarburos y Recursos Minerales en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2022-2023, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado 'Estudio estructural de Sirenum Fossae: Exploración de diques en Marte' y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyos tutores son: Ignacio Romeo Briones y Samuel Rivas-Dorado

DECLARO QUE: El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 31 de Julio de 2023.

Fdo.:

Patricia Solana

Agradecimientos

Lo primero es ser agradecida. Gracias al que ha hecho posible la existencia del escrito, el tutor de este trabajo, Ignacio Romeo Briones, por construirme el puente hacia el mundo de la Geología Planetaria y que me ha llevado hasta el otro lado del océano. Gracias a Sam Rivas-Dorado, cotutor con una inmensa paciencia que iguala casi a su inteligencia.

Gracias a mi familia. Gracias a mi madre por su amor incondicional. Gracias a mi hermano por la admiración que me despierta. Y gracias a mi padre, que no me dio por vencida.

Índice

0. Resumen.....	iv
1. Introducción.....	1
1.1. Tectónica extensional y emplazamiento de diques en Marte	2
1.2. Tharsis y Sirenum Fossae	4
1.3. Graben inducidos por diques	6
2. Objetivos.....	7
3. Métodos	8
3.1. Datos GIS y cartografía de fallas.....	8
3.2. Balanceo de áreas.....	10
3.3. Medida del buzamiento de las fallas que limitan el graben.....	13
4. Resultados y discusión	14
4.1. Cartografía y características estructurales	14
4.2. Medidas de los buzamientos de las fallas	15
4.3. Modelado estructural de los diques	17
4.4. Implicaciones en la futura exploración de recursos minerales	26
5. Conclusiones.....	27
6. Bibliografía.....	27
7. Anexos	34

0. Resumen

Los diques son una diana en el mundo de la exploración por su alta probabilidad de albergar mineralizaciones y conocer sus dimensiones y profundidades resulta esencial para la valoración de un proyecto de explotación de los recursos minerales. Marte tiene una elevada actividad magmática que resulta en provincia volcánicas completas y con estructuras de grandes dimensiones, entre ellas, sistemas de diques gigantes. Sirenum Fossae es un sistema de graben de 2700 km y algo menos de 70 km de anchura al sur de Tharsis, Marte. Esta morfología del sistema sólo se explica si los graben son inducidos por diques gigantes que tienen su fuente en Arsia Mons. La apertura y profundidad de los diques se han modelado a partir de la anchura y profundidad del respectivo graben junto con el buzamiento de las fallas que limitan los graben mediante el método del balanceo de áreas. Los buzamientos de las fallas de los graben también se han calculado en puntos donde la topografía lo permite, obteniendo buzamientos cercanos a los 60°. Los resultados modelados obtenidos son una anchura media de los diques de ~106 m y unas profundidades de entre 1 y 3 km hasta el ápice del dique, profundidades que varían ligeramente a lo largo de un mismo dique por la posibilidad de presentar una morfología de raíz, cuello y cabeza bajo la superficie. Además, las relaciones de aspecto, anchura-profundidad, de los diques de Sirenum coinciden con la tendencia terrestre y marciana, lo que ayuda a predecir las dimensiones bajo la superficie de los diques.

1. Introducción

Los diques se definen como intrusiones ígneas tabulares estrechas generadas a partir de un magma con cierto grado de fraccionamiento que atraviesa la corteza de planetas y satélites rocosos empleando fracturas frágiles abiertas. Los diques están asociados habitualmente con mineralizaciones tanto de origen hidrotermal como magmático. Con frecuencia, el magma sufre una diferenciación durante la cristalización de sus minerales según el coeficiente de distribución de los elementos durante el enfriamiento. Además, posteriormente al emplazamiento, pueden tener lugar alteraciones hidrotermales por la interacción con fluidos freáticos y/o superficiales. Por eso, debido a su vínculo con estos procesos, estas estructuras se catalogan como puntos de la corteza con potencial para generar un enriquecimiento de minerales, lo que los convierte en un importante foco en el mundo de la exploración de recursos minerales. Actualmente, los diques de mayor interés explorativo en la Tierra son los de tipo pegmatítico, caracterizados por la presencia de cristales de gran tamaño (>2cm), de donde se extraen minerales industriales (micas, feldespatos) y que comúnmente se encuentran enriquecidos en metales importantes para la industria como el litio.

Para la exploración de recursos minerales es importante conocer ciertos parámetros del yacimiento antes de empezar con la explotación. Aparte de los datos básicos como el tonelaje, la ley de cut-off y observaciones geofísicas, geoquímicas y petrofísicas, también es de gran relevancia determinar la estructura y geometría del yacimiento. Conocer la profundidad a la que se encuentra el yacimiento y sus dimensiones será indispensable a la hora de calificar un yacimiento como recurso o reserva, es decir, si es potencialmente explotable ahora o en el futuro. Además, ayudará en la etapa de evaluación del yacimiento en la que se estudia su viabilidad económica, diseño, planificación de la maniobra y construcción de la operación, así como el equipo necesario para su extracción. En el presente trabajo se aborda el estudio de la geometría y emplazamiento de diques en Marte empleando técnicas clásicas de geología estructural como son la cartografía estructural y el balanceo de áreas. Si bien la explotación de posibles recursos minerales en otros cuerpos planetarios puede parecer, a priori, muy lejana en el tiempo, la evaluación de estos recursos en Marte ha comenzado ya (West y Clarke, 2010) como parte de los trabajos de exploración de otros cuerpos planetarios cercanos a la Tierra.

La actividad volcánica de Marte es muy relevante y los volúmenes de magma que se mueven son muy superiores a los de la Tierra, creando un sistema ígneo completo y de grandes dimensiones. El emplazamiento de diques de hasta cientos de

kilómetros de longitud origina en superficie sistemas de grabens largos y estrechos generados en un ambiente tectónico extensional (Mège y Masson, 1996; Ernst et al., 2001; Mège et al., 2003; Schultz et al., 2004; Wyrick y Smart, 2009). La geometría en superficie de los grabens inducidos por diques puede ser usada para determinar la profundidad y dimensión del dique que lo induce (Rivas-Dorado et al., 2021, 2022, 2023).

1.1. Tectónica extensional y emplazamiento de diques en Marte

Marte es un planeta más pequeño que la tierra (aproximadamente 1/9 de la masa y la mitad del radio terrestres) que no presenta tectónica de placas, cuyos procesos tectónicos están controlados, principalmente, por la presencia de grandes plumas mantélicas que han permanecido estables generando una intensa actividad volcánica desde hace miles de millones de años. La actividad volcánica se presenta en dos provincias que dominan gran parte de la superficie marciana: Tharsis y Elysium. Estas provincias contienen numerosos edificios y materiales volcánicos además de rasgos estructurales propios de un ambiente tectónico extensional como zonas de rift (Kneller et al., 2019) y cuencas extensionales (Anderson et al., 2019). Esta actividad está causada por la presencia de una pluma mantélica gigante bajo la región de Tharsis, la cual fue la causante de la tectónica y vulcanismo regional durante el Noeico y Hespérico (Mège y Masson, 1996; Ruj et al., 2022; Broquet y Andrews-Hanna, 2023). Sin embargo, aunque hasta hace unos años la historia de los episodios volcánicos y extensionales se creía finalizada y se consideraba a Marte como probablemente un planeta tectónicamente inactivo, la misión InSight ha detectado varios martemotos de baja magnitud (<5) en la provincia volcánica de Elysium (Rivas-Dorado et al., 2022; Broquet y Andrews-Hanna, 2022). Estas observaciones indican la presencia de una pluma mantélica activa que empuja la litosfera desde el interior y que podría ser la causa de la actividad sísmica actual, el vulcanismo y las características estructurales alrededor de la provincia volcánica de Elysium (Broquet y Andrews-Hanna, 2022; Crane, 2022; Plait, 2023).

Entre las estructuras más destacables que se observan alrededor de ambas provincias volcánicas, aparte de flujos de lava y edificios volcánicos de distintos tamaños, aparecen sistemas de graben largos y estrechos (relaciones de aspecto de 1:100). Estos sistemas de grabens se presentan con una disposición espacial predominantemente radial (aunque también aparece algún caso concéntrico) respecto a los edificios volcánicos (Bouley et al., 2018) y se adaptan al campo de esfuerzos de la tectónica y el vulcanismo regional (Kneller et al., 2019), por eso, se relacionan con la

deformación del dominio frágil causada por el crecimiento de las provincias volcánicas (Kneller et al, 2019).

Algunos artículos (Chadwick y Embley, 1998; Hjartardóttir et al., 2014; Himematsu y Furuya, 2020; Drymoni et al., 2022; Mastin y Pollard, 1988) explican a través de modelos y ejemplos terrestres (Islandia, Italia, Etiopía, California...) cómo grabens asociados a provincias volcánicas son originados por la intrusión de diques verticales someros y subparalelos a la superficie. El emplazamiento de estos diques provoca una compresión adyacente a ellos y extensión por encima de su ápice (Xu et al., 2016). Esta extensión generada durante la intrusión, genera desplazamientos y esfuerzos extensionales que se ajustan a través de fallas normales (Figura 1) donde en los márgenes del dique se produce un movimiento hacia arriba de la topografía y, sobre el dique, una depresión o movimiento hacia abajo (Rivas-Dorado, et al., 2022). Esta misma teoría es la que se ha usado para explicar los grabens alrededor de los edificios volcánicos de Elysium y Tharsis (Mège et al., 2003; Schultz et al., 2004; Wyrick y Smart, 2009; Hardy, 2016; Rivas-Dorado et al., 2021).

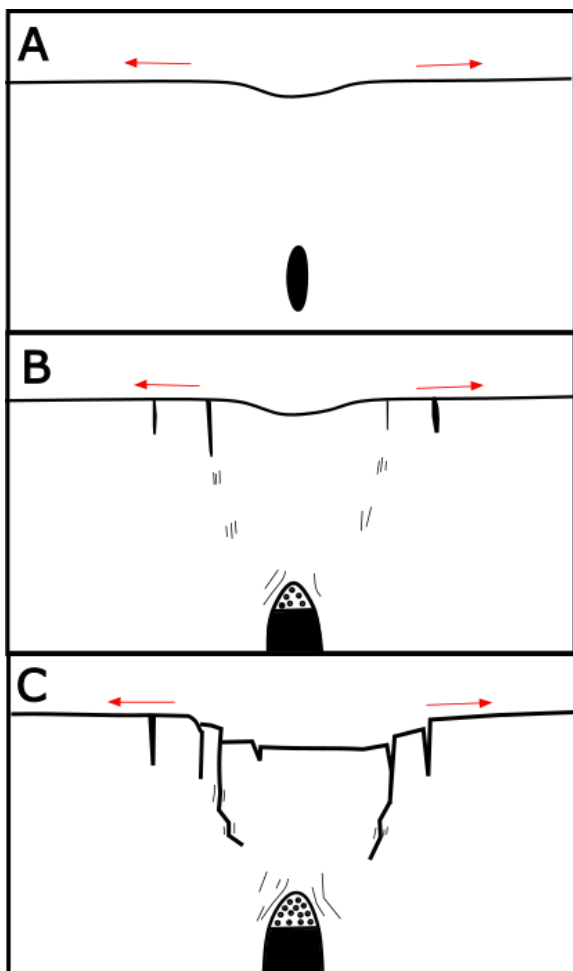


Figura 1. Secuencia de la formación de un graben inducido por la extensión provocada por la intrusión de un dique modificada de Chadwick y Embley (1998) según los datos de laboratorio de Mastin y Pollard (1988) basado en el sistema de diques y fisuras en Inyo Craters, California.

1.2. Tharsis y Sirenum Fossae

Tharsis es la provincia volcánica más grande de Marte y se encuentra en la parte occidental y ecuatorial del planeta. Está caracterizada por una altiplanicie con grandes edificios volcánicos y cubierta por coladas de lava superpuestas procedentes de consecutivas erupciones. Entre la gran cantidad de volcanes que presenta, destacan, por su tamaño, cuatro volcanes que superan los 14 km de altura: Olympus Mons, Ascaeus Mons, Pavonis Mons y Arsia Mons (Figura 2).

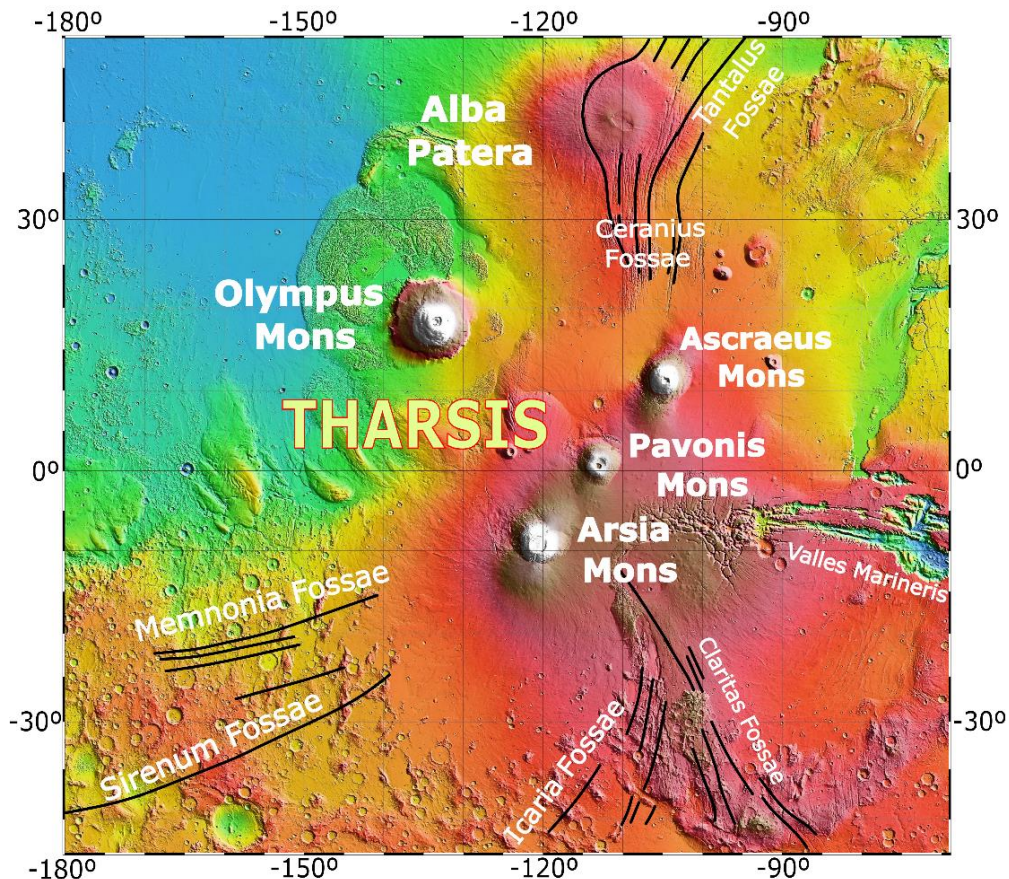


Figura 2. Modelo digital del terreno por altimetría laser (MOLA) del domo de Tharsis sobre el cual se han indicado con líneas negras los sistemas de grabens más relevantes (Sirenum Fossae, objeto del presente estudio, está situado al suroeste) con orientaciones radiales respecto a los edificios volcánicos más grandes (Olympus Mons, Alba Patera, Ascaeus Mons, Pavonis Mons y Arsia Mons).

Al suroeste de Arsia Mons, en la llamada región de Terra Sirenum, se encuentra Sirenum Fossae (Figura 2), uno de los cinco sistemas de fallas extensionales asociados al crecimiento de la provincia volcánica de Tharsis (Anderson et al., 2001; Wilson y Head, 2002; Anderson et al., 2019). Sirenum Fossae es un sistema de grabens muy largo y estrecho que se formó a raíz de sucesivos eventos de pulsos magmáticos (Goudy y Schultz, 2005) a causa de los esfuerzos tectónicos provocados por el desarrollo de Arsia Mons (Anderson et al., 2012; Anderson et al., 2019). Anderson et al.

(2019) datan las fallas de Sirenum Fossae en el Noeico medio-superior, durante los estadios iniciales del desarrollo de Tharsis, mientras que Kneissl et al. (2015) asignan al sistema una edad Hespérico Superior (Figura 3), según las relaciones de corte y cruce de los graben con otras unidades estratigráficas datadas de manera absoluta por densidades de cráteres.

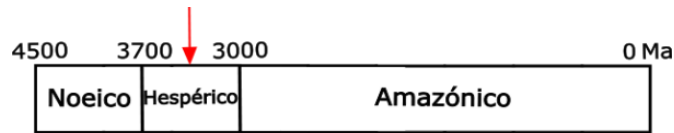


Figura 3. Tabla cronoestratigráfica indicando las principales eras de la historia geológica de Marte. La flecha roja indicaría la edad aproximada de los grabens de Sirenum Fossae siguiendo las relaciones de corte y cruce con otras unidades estratigráficas analizadas por Kneissl et al., 2015.

El sistema corta unidades del Noeico Inferior, Medio y Superior (Kneissl et al., 2015). Además, corta unidades de transición entre el Noeico y el Hespérico en Gorgonum Chaos, (Howard y Moore, 2011; Wendt et al., 2013), una subcuenca diseccionada y rodeada por antiguos valles fluviales que pudo haber albergado un lago helado (Márquez González et al., 2005; Howard y Moore, 2011; Capitan y Van de Wiel, 2011; Haack et al., 2021) que fue drenado o desecado hace 3700 Ma aproximadamente (Haack et al., 2021), sin embargo, a finales del Hespérico y principio del Amazónico la actividad fluvial regresó a la cuenca (Howard y Moore, 2011; Wendt et al., 2013). Sirenum Fossae también corta una unidad volcánica del Hespérico Inferior (Kneissl et al., 2015). La terminación noreste de Sirenum Fossae fue enterrada bajo coladas de lava (Wilson y Head, 2002; Kneissl et al., 2015) de Arsia Mons que fueron datadas del Amazónico por Crown y Ramsey (2017).

La longitud de Sirenum Fossae alcanza más de 2700 km con una anchura de apenas 70 km y con una orientación WSW-ENE radial a Arsia Mons. La relación de aspecto de la estructura (1:38) es muy larga y estrecha a diferencia de otros sistemas extensionales más anchos de tipo rift (por ejemplo, Claritas Fossae). Esta morfología del sistema de graben mantenida durante tantos kilómetros con tan poca anchura solo puede explicarse si ha sido generada por una intrusión de un gran dique o sistema de diques a poca profundidad. Los grabens de Sirenum Fossae se dividen en segmentos subparalelos entre sí produciéndose relevos entre ellos, dando lugar en ocasiones a escalonamientos. Leves cambios en la dirección del dique en profundidad pueden estar causados como consecuencia de posibles obstáculos mecánicos encontrados durante la propagación de la rotura como, por ejemplo, cambios litológicos. La orientación de las grietas de tracción que se abren en el terreno es en cambio muy constante, siendo siempre perpendiculares al mínimo esfuerzo tectónico en la horizontal, por este motivo

las variaciones de dirección del dique en profundidad se resuelven cerca de la superficie con relevos *en echelon* hacia la derecha o hacia la izquierda y, en algunos casos, con geometría sigmoidal (Martín-González et al., 2004).

Los segmentos de los graben tienen longitudes de unas decenas de kilómetros hasta incluso cientos de kilómetros, anchuras de menos de 5 km (Anderson et al., 2019) y profundidades de 100 a 300 metros (Wilson y Head, 2002; Martín-González et al., 2004). Cada uno de estos segmentos de graben se corresponde con la presencia de un dique somero, aunque en profundidad todo el sistema se enlaza probablemente en un único cuerpo ígneo. En las zonas más profundas, los graben pueden superar hasta el kilómetro de profundidad. Estas zonas pueden reconocerse como valles (Anderson et al., 2019), en donde el agua superficial provoca la erosión del interior del graben y la recesión de la línea del escarpe; o como “pit chains” (Ferril et al., 2011; Kakaria y Yin, 2023; Krishnan, 2023), es decir, cadenas de pozos que son originados por el desplome o colapso de las cavidades bajo los grabens o por explosiones debido a la interacción del magma con aguas subterráneas (Márquez González et al., 2005) o con la criosfera (Russell and Head, 2007; Kakaria y Yin, 2023) durante el emplazamiento de los diques (Wyrick et al., 2004; Ferril et al., 2011; Wyrick y Buczkowski, 2022).

1.3. Graben inducidos por diques

Anteriormente, Rubin y Pollard (1988) estudiaron el comportamiento de las fallas en zonas de rift en Islandia y Afar, mostrando cómo el desplazamiento de estas fallas y la profundidad del graben son buenos indicadores de la profundidad del dique. Más tarde, Rubin (1992) elaboró un modelo 3D de la zona de rift Krafla, Islandia, en el que se evalúan los ratios entre la anchura del graben y la profundidad del ápice del dique (~3,5) y entre la profundidad del graben y la anchura del dique (~1,25).

En otros cuerpos rocosos del Sistema Solar, distintos de Marte y la Tierra, también se han encontrado grabens inducidos por diques, como Mercurio, Venus e incluso en la Luna. Head y Wilson (1993) estudiaron grabens lunares interpretados como generados a consecuencia del emplazamiento de magma somero para calcular el techo y anchura del dique a partir de las características estructurales de las fallas del graben. Podda et al. (2020) analizaron algunas características de los grabens usando los datos del Lunar Reconnaissance Orbiter, satélite orbitando actualmente alrededor de la Luna, y del LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter).

En Marte, Scott et al. (2002) aplicaron las relaciones de aspecto de Rubin (1992) para hacer una aproximación de los parámetros de los diques de Alba Patera. Schultz

et al., (2004) utiliza los datos del MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter) PEDR (Precision Experiment Data Record) para recrear perfiles transversales de los grabens de Tharsis y, así, deducir una profundidad de los diques subterráneos a partir de un modelo de la geometría del dique y de las fallas normales (con un buzamiento teórico de 70°) que mejor se ajuste al desplazamiento en la superficie. De esta misma forma, Goudy y Schultz (2005) extrae perfiles de graben estrechos localizados en tres áreas diferentes al sur de Arsia Mons a fin de analizar su morfología, sus dimensiones y la concavidad del escarpe de falla y de esta forma determinar la influencia de los diques en el desarrollo de los sistemas de grabens, concluyendo que los grabens están claramente, y en la mayoría de los casos, relacionados con la intrusión de los diques.

En los últimos años, Rivas-Dorado et al. (2021, 2022, 2023) han estudiado los sistemas de graben y los diques que los inducen de la región de Elysium, en Elysium Fossae y Cerberus Fossae, basándose en un método conocido como 'balanceo de áreas' a partir de cortes transversales a los grabens. Los resultados del uso de este método fueron positivos. Los parámetros resultantes de los diques tenían un sentido teórico y las ratios anchura-longitud del dique tuvieron una relación equivalente a la que tienen las fracturas inducidas por fluidos.

Sin embargo, Wyrick y Smart (2009) y Magee y Jackson (2021) explican la incertidumbre (sobreestimación y subestimación) de calcular los parámetros del dique a partir de los parámetros superficiales del graben. Magee y Jackson (2021) concluyen que no es posible hacer una aproximación de los parámetros del dique sin un conocimiento previo de las variaciones de las fallas o del comportamiento de la roca encajante a los esfuerzos en profundidad.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es explorar la geometría de los diques subyacentes a Sirenum Fossae mediante la cartografía y el estudio estructural del sistema de graben. Mediante este estudio estructural podemos obtener una aproximación de algunos parámetros geométricos de los diques, especialmente sus anchuras y las profundidades a la que se encuentra su ápice superior. Como objetivo secundario se obtiene una base de datos con las relaciones de aspecto de la familia de diques que dan lugar a los graben. Para la consecución del objetivo principal se ha utilizado el método del balanceo de áreas en cortes seleccionados. Esta técnica requiere a su vez conocer el buzamiento de las fallas que forman el graben. Por este motivo y

como objetivo secundario es necesario estimar el buzamiento de dichas fallas evitando de este modo emplear un valor teórico para dicho parámetro.

3. Métodos

El flujo de trabajo es similar al que siguen Rivas-Dorado et. al. (2021) en los sistemas de diques gigantes de Elysium Fossae y Cerberus Fossae, en la provincia volcánica de Elysium: primero, cartografiar y reconocer los diferentes grabens con el trazado de las fallas que los limitan y, en segundo lugar, aplicar el balanceo de áreas en cortes seleccionados para calcular la anchura y profundidad del ápice superior del dique, que necesita una medición previa de los parámetros estructurales de los grabens (anchura y profundidad y en donde sea posible estimarlo, el buzamiento de las fallas normales que los limitan).

3.1. Datos GIS y cartografía de fallas

Antes de proceder al cálculo de los parámetros de los diques es necesaria una evaluación de la morfología y topografía de Sirenum Fossae para, así, cartografiar las fallas y llevar a cabo un reconocimiento de los mejores perfiles de los que poder obtener los datos más fiables en los parámetros de graben requeridos durante el 'Balanceo de áreas'. La cartografía estructural de los graben así como la selección de los perfiles topográficos para aplicar el balanceo de áreas, se ha realizado montando un Sistema de Información Geográfica en QGIS con diferentes sets de datos obtenidos en misiones espaciales a Marte de la NASA y la ESA y disponibles en abierto gracias a las políticas de compartición de datos para promover la ciencia que llevan a cabo ambas agencias espaciales. Los sets de datos sobre los que se ha trabajado para la cartografía de fallas y extracción de los perfiles son, primero, un modelo de elevación digital de los datos recogidos por el MOLA enriquecidos con los modelos digitales generados a partir de los datos del HRSC, y, segundo, las imágenes diurnas de THEMIS.

El Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) es un instrumento del Mars Global Surveyor (MGS), misión que fue lanzada en 1996 que mapeó y recopiló los datos altimétricos laser de Marte, la rugosidad de la superficie, así como su reflectividad con una longitud de onda de 1064 nm y la altura de nubes de polvo y volátiles. MOLA ha sido una herramienta esencial en estudios geofísicos, geológicos y atmosféricos de Marte (Smith et al., 2001; Demidov et al., 2008).

El objetivo principal del MOLA fue la investigación de la topografía de Marte. El instrumento funciona lanzando pulsos de láser infrarrojo y calculando el tiempo desde la salida de la nave hasta la llegada a la superficie de Marte. Cada pulso tiene una huella

de medición de aproximadamente 168 metros de diámetro y se toman desde puntos de la trayectoria del MGS a 400 km de altitud y separadas 300 metros entre sí (Smith et al., 2003 en Schultz et al., 2004; Xiao et al., 2022; Neumann et al., 2001). Las medidas de estos pulsos de láser tienen un margen de error de 100 metros en la horizontal y 1 metro en la vertical (Neumann et al., 2001), pero que, sumado al error global del geoide marciano, se calcula un error vertical total de ± 3 m. De cualquier forma, el resultado de las medidas es una reproducción de la topografía de Marte de alta resolución (Smith et al., 2001).

El modelo digital del terreno utilizado en este proyecto es una versión basada en los datos de MOLA a la que se han añadido datos topográficos de mayor resolución (en las regiones en las que está disponibles) procedentes de la fotogrametría de las imágenes tomadas por el instrumento HRSC (High Resolution Stereo Camera) de la misión europea Mars Express. El HRSC lleva equipados nueve sensores que escanean la superficie de Marte desde diferentes ángulos en un mismo instante. Estas imágenes se solapan entre sí y permiten crear una imagen de Marte en color 3D. Sin embargo, para obtener datos fotométricos consistentes, el HRSC debe escanear una zona varias veces, es decir, una sola órbita del instrumento no es suficiente. Por eso, en ciertas zonas donde no se han superpuesto varias franjas de muestreo la resolución es menor (Pinet et al., 2006; Jehl et al., 2006; Jehl et al., 2008). El HRSC tiene una resolución de 10 metros por píxel en las franjas con menor resolución mientras que las franjas disponibles con mayor resolución tienen un error menor a 2 metros en la vertical (Jaumann et al., 2007).

Por otro lado, el THEMIS (Thermal Emission Imaging System) es otro instrumento, en este caso de la misión Mars Odyssey Orbiter, capaz de tomar imágenes infrarrojas y del espectro visible de Marte. Esto proporciona información sobre la composición y temperatura de los materiales superficiales (Edwards et al., 2011). THEMIS dispone de dos conjuntos de imágenes que abarcan todo el planeta: THEMIS Day, generado a partir de las radiaciones durante el día; y el THEMIS Night, creado a partir de las radiaciones durante la noche sin luz solar. Las imágenes diurnas de THEMIS están fuertemente controladas por la topografía (más brillo en las superficies orientadas al sol y menos brillo en aquellas que están a la sombra) siendo un set de imágenes muy útiles para realizar cartografía estructural permitiendo delinear con precisión los escarpes de falla. Por el contrario, las imágenes nocturnas de THEMIS son indicativas de la composición de los materiales superficiales, resultando más útiles en otro tipo de cartografías.

Los perfiles y las medidas de los grabens necesarias para llevar a cabo el cálculo del balanceo de áreas se miden directamente sobre los datos del modelo digital del terreno de MOLA-HRSC, a partir del sistema de referencia utilizado en el proyecto que es IAU2000:49968: Mars Equidistant Cylindrical AUTO. Aunque los sistemas de referencia cilíndricos son conocidos por sufrir una gran distorsión de las medidas en latitudes altas, Sirenum Fossae se encuentra cerca de la zona ecuatorial del planeta, por lo que la distorsión generada por la proyección en los perfiles realizados que son de muy corta longitud resultan negligibles. Las fuentes de error de las medidas directas de los parámetros de los graben será una combinación entre los errores aleatorios y sistemáticos del instrumento MOLA (~1m) (Neumann et al., 2001) y, además, se debe tener en cuenta la bajada de resolución de las secciones que no tienen datos del HRSC, por lo que esas zonas tendrán menos precisión y menor calidad.

3.2. Balanceo de áreas

El modelado mediante métodos clásicos de geología estructural de los grabens permite calcular las dimensiones y geometrías de los diques subyacentes. El método del balanceo de áreas es un concepto geométrico aplicado en geología estructural que permite resolver diversas cuestiones como, por ejemplo, estimar la profundidad a la cual se encuentra el nivel de despegue en sistemas compresivos de pliegues y cabalgamientos, estimar el cambio de espesor en los estratos durante el desarrollo de pliegues (Contreras et al., 2016) o restaurar la longitud de las líneas y balancear las áreas de modelos de cabalgamientos a su estado pre-tectónico para conocer su forma original y comprobar que la estructura es geoméricamente posible (Groshong, 2019).

Rivas-Dorado et al. (2021, 2022) utiliza este método en Elysium Fossae y Cerberus Fossae, dos sistemas de grabens similares a Sirenum Fossae, pero más modernos y tectónicamente activos según señalan terremotos detectados por la misión InSight recientemente bajo el sistema de Cerberus Fossae. El método del balanceo de áreas aplicado en grabens inducidos por diques como los de Cerberus Fossae y Sirenum Fossae permite, con el conocimiento de ciertos parámetros (anchura del graben, profundidad del graben y buzamiento de las fallas que limitan el graben), calcular una profundidad aproximada a la que se encuentra el ápice superior del dique a partir de un perfil transversal al graben. La estimación de la extensión horizontal producida por las fallas normales que limitan el graben sirve a su vez como una buena aproximación de la potencia del dique subyacente que ha inducido su movimiento. El balanceo de áreas se basa en la conservación del material en un corte (conservación del área). Por este motivo, el área perdida del graben es la misma que el área ganada

lateralmente durante la extensión. Además, para poder aplicar el balanceo de áreas es necesario asumir que la deformación es plana, es decir que no hay pérdida ni ganancia de material en la dimensión fuera del corte, que el transporte tectónico es paralelo al perfil y que se conoce la topografía original (es decir nos sirve como buen marcador de la deformación) (Rivas-Dorado et al., 2021). Emplear la conservación de las áreas también implica asumir que las deformaciones no involucran cambios en el volumen de la roca (ni dilataciones ni contracciones volumétricas).

Los parámetros necesarios para llevar a cabo la determinación de la profundidad del dique mediante el método del balanceo de áreas se relacionan entre sí con fórmulas básicas y necesarias que son la fórmula del área total del graben y la determinación de la extensión total producida por la intrusión. Ambas fórmulas se trabajan en el plano 2D del perfil transversal (Figura 4).

Por un lado, el área del graben se simplifica a la de un trapecio, el cual estaría limitado por los escarpes de las fallas normales a cada lado del graben (Figura 4), cuyo valor viene dado por

$$(1) \quad A_g = \frac{G_{w1} + G_{w2}}{2} G_d$$

donde, A_g es el área total del trapecio (área del graben), G_{w1} es la anchura superior del graben, G_{w2} es la anchura inferior del graben medida desde la base de cada escarpe de falla y G_d es la profundidad del graben.

La profundidad del graben (G_d) se mide directamente sobre los datos del modelo digital del terreno de MOLA-HRSC al igual que la anchura superior del graben (G_{w1}), que es la distancia horizontal entre los límites superiores de los escarpes de falla. La anchura inferior del graben (G_{w2}) es la diferencia entre la anchura superior (G_{w1}) y el desplazamiento extensional total producido a cada lado de la falla (D), el cual, a su vez, se determina a partir del ángulo de buzamiento (β) de las fallas (cuyo cálculo se explica más adelante) y la profundidad del graben (Figura 4). Este método permite incluir en el área del graben calculada teóricamente los materiales sedimentarios acumulados en la base de los escarpes de falla que pueden enmascarar parcialmente la geometría original del graben.

$$(2) \quad G_{w2} = G_{w1} - D$$

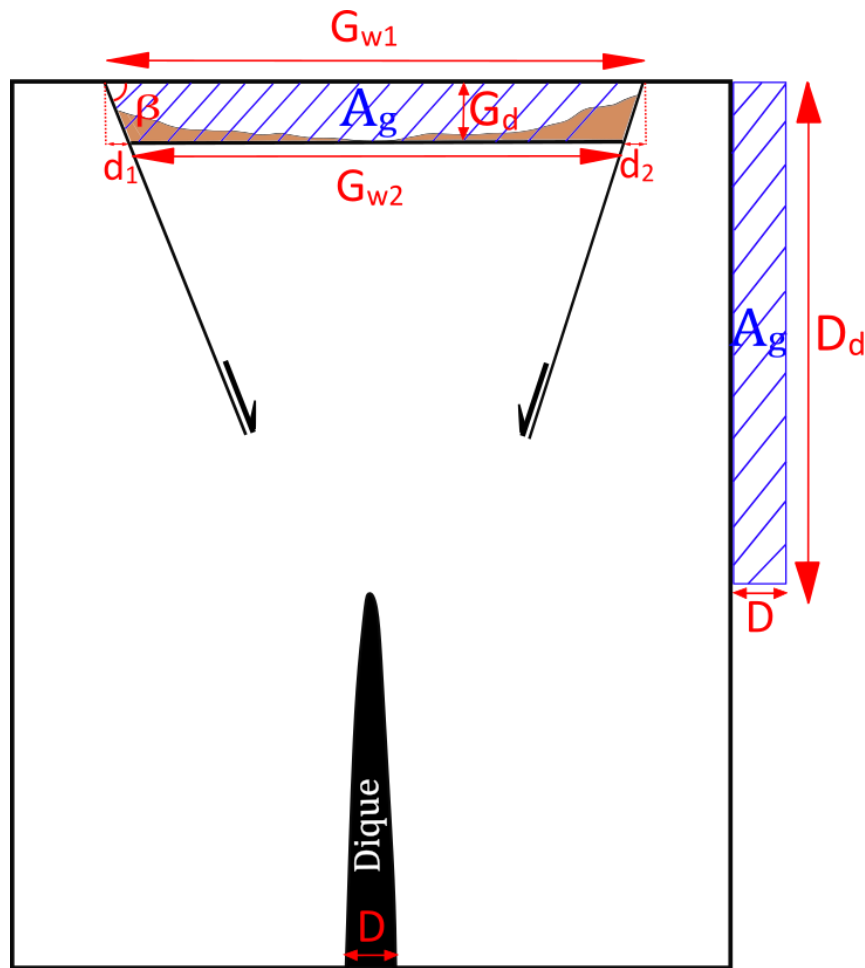


Figura 4. Esquema explicativo del método del balanceo de áreas aplicado en graben inducidos por diques sobre un perfil transversal a éstos. Se muestran los parámetros utilizados para el desarrollo del balanceo de áreas, así como las relaciones entre los parámetros del graben con los del dique que lo induce. (G_{w1} = anchura mayor del graben. G_d = Profundidad del graben. d_1 y d_2 = extensión horizontal producida por las fallas. B = buzamiento de las fallas. D_d = profundidad del dique. D = extensión horizontal total equivalente a la anchura del dique. A_g = área del graben).

Por otro lado, la extensión horizontal total que es una buena estimación de la potencia del dique tiene que ser necesariamente igual a la suma de la extensión horizontal producida en cada falla, luego (Figura 4)

$$(3) \quad D = d_1 + d_2$$

donde D es el desplazamiento extensional y d_1 y d_2 se corresponden con la extensión horizontal producida por cada falla.

Calculando el desplazamiento extensional total (D) con los parámetros del graben medidos directamente sobre el modelo digital y según la Figura 4,

$$(4) \quad D = \frac{2G_d}{\tan(\beta)}$$

donde D es desplazamiento extensional, G_d la profundidad del graben y β el buzamiento de las fallas.

Finalmente, igualando las áreas podemos obtener la profundidad del ápice superior del dique (D_d) a partir de datos previamente medidos según,

$$(5) \quad D_d = \frac{1}{2}(G_{w1} \tan(\beta) - G_d)$$

donde D es la extensión horizontal total (igual a la anchura del dique), G_{w1} es la anchura del graben medida desde el extremo superior de cada escarpe, β es el buzamiento de las fallas y G_d la profundidad máxima del graben.

3.3. Medida del buzamiento de las fallas que limitan el graben.

Las estimaciones del ángulo de buzamiento (β) de las fallas normales de Marte presentan valores entre los 46° (Vaz et al., 2014) y 55° (Schultz et al., 2010). Una forma sencilla de calcular este ángulo (β) en un graben consiste en medir las variaciones de su anchura cuando el graben atraviesa un elemento topográfico con un cambio de altura importante (Figura 5), como pueden ser, por ejemplo, anillos de cráteres de impacto o crestas compresivas generadas por grandes fallas inversas y sus pliegues asociados. En función de la geometría del graben, simplificada a la de un trapecio, y sabiendo la diferencia de altura entre a un lado y otro del escarpe que atraviesa el graben (este escarpe no se refiere a los escarpes de falla del graben si no al cambio abrupto de pendiente asociado a la estructura que es atravesada por el graben), es posible calcular con trigonometría el ángulo de buzamiento de la falla a partir de la extracción de un triángulo rectángulo del trapecio (Figura 5).

Del esquema de la Figura 5, se deduce que:

$$(6) \quad a = \frac{W_1 - W_2}{2}$$

$$(7) \quad \tan\beta = \frac{h}{a} = \frac{2h}{W_1 - W_2}$$

$$(8) \quad \beta = \arctan\left(\frac{2h}{W_1 - W_2}\right)$$

donde W_1 y W_2 son las anchuras mayor (medida en el alto topográfico) y menor (medida en la zona topográficamente baja, fuera de la estructura que genera el alto topográfico) del graben, β es el buzamiento de la falla, a es la extensión producida por cada falla, h es la diferencia de cota entre el corte realizado en el alto topográfico y el corte realizado en el bajo topográfico.

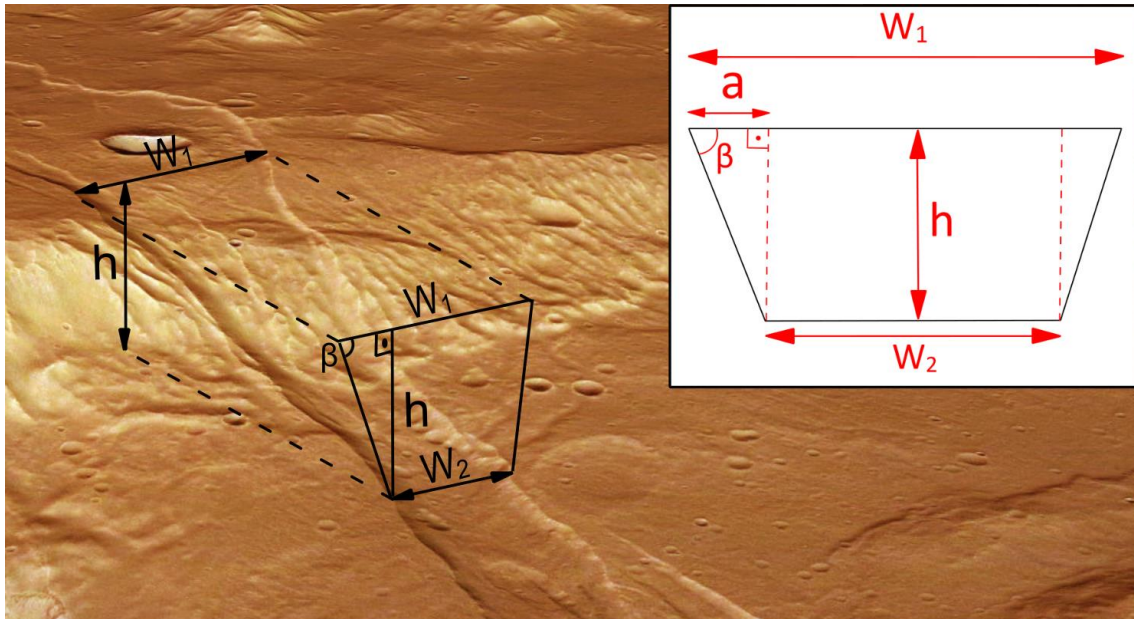


Figura 5. Imagen 3D (habilitada por la ESA, DLR German Aerospace Center y la Freie Universität de Berlín) donde se señalan los parámetros medidos (W_1 , W_2 y h) en la zona de un punto de medición para el cálculo del buzamiento de las fallas junto a un esquema visual de los parámetros del graben usados en el cálculo de los buzamientos de las fallas, cuando el graben atraviesa una estructura con un cambio de altura importante. La parte superior del trapecio (W_1) se corresponde con la anchura del graben en un alto topográfico y la parte inferior (W_2) en un bajo topográfico.

4. Resultados y discusión

4.1. Cartografía y características estructurales

Los graben de Sirenum Fossae se dividen en segmentos subparalelos entre sí. El sistema se dispone con una orientación radial con respecto a Arsia Mons, cuya dirección de los segmentos más proximales es NE-SW y van desviándose hasta alcanzar una dirección E-W al final de su recorrido.

Sirenum Fossae atraviesa una topografía muy diversa desde zonas con una elevación cercana a los 4000 metros hasta zonas deprimidas como el paleolago en Gorgonum Chaos, donde la elevación es negativa (está por debajo del radio planetario medio). Los graben tienen mayores anchuras en las zonas elevadas, en las que se ha

llegado a medir una anchura de 6 km (graben 6, Figura 9) para una longitud de algo más de 1000 km. Sin embargo, la anchura de los graben es de 1-3 km y la longitud es de unos centenares de kilómetros. Por otro lado, la media de las profundidades no supera los 100 metros siendo la mayor profundidad la correspondiente con el graben 5 (Figura 9), que alcanza casi los 300 metros.

Además de la gran longitud de cada graben individual (de hasta varios cientos de kilómetros), las características más significativas de los graben de Sirenum Fossae que se aprecian a lo largo de todo su recorrido son los saltos o relevos morfológicas *en echelon*, es decir, escalones hacia la derecha y hacia la izquierda, y estructuras sigmoidales como reconocían Martín-González et al. (2004) (Figura 6). Las bifurcaciones de los graben también son comunes, creando un horst con terminación en 'v' entre las dos ramas bifurcadas que recuerda a la geometría de las barras de un sistema fluvial braided.

Otra característica de Sirenum Fossae que lo diferencia fácilmente de otros sistemas de grabens es la geomorfología que se observa en la parte inicial del sistema más cercana a la provincia volcánica, al noreste. Esta zona se encuentra significativamente afectada probablemente por un flujo de agua en el graben durante o tras el periodo de intrusión de los diques. Esto queda reflejado en la geomorfología de los graben, en los que los escarpes y el suelo sufrieron una gran erosión, dando como resultado escarpes retraídos y grabens de gran profundidad, similar a la morfología de un valle o un cañón. También hay pequeñas zonas de depresión alineadas a lo largo de las fracturas que se identifican como 'pit chains' por causa de explosiones freatomagmáticas, o bien por el hundimiento de terrenos poco consolidados sobre fisuras abiertas.

4.2. Medidas de los buzamientos de las fallas

Las medidas de los buzamientos se han calculado en cinco zonas seleccionadas en las que se observa, en cada una de ellas, una diferencia de elevación suficiente en un corto recorrido que permite apreciar la diferencia de anchura del graben entre la zona elevada y deprimida causada por el buzamiento de las fallas.

Los puntos en los cuales se han realizado las medidas (Figura 7) están ubicados en cráteres de impacto anteriores a la formación de Sirenum Fossae, en las que el fondo

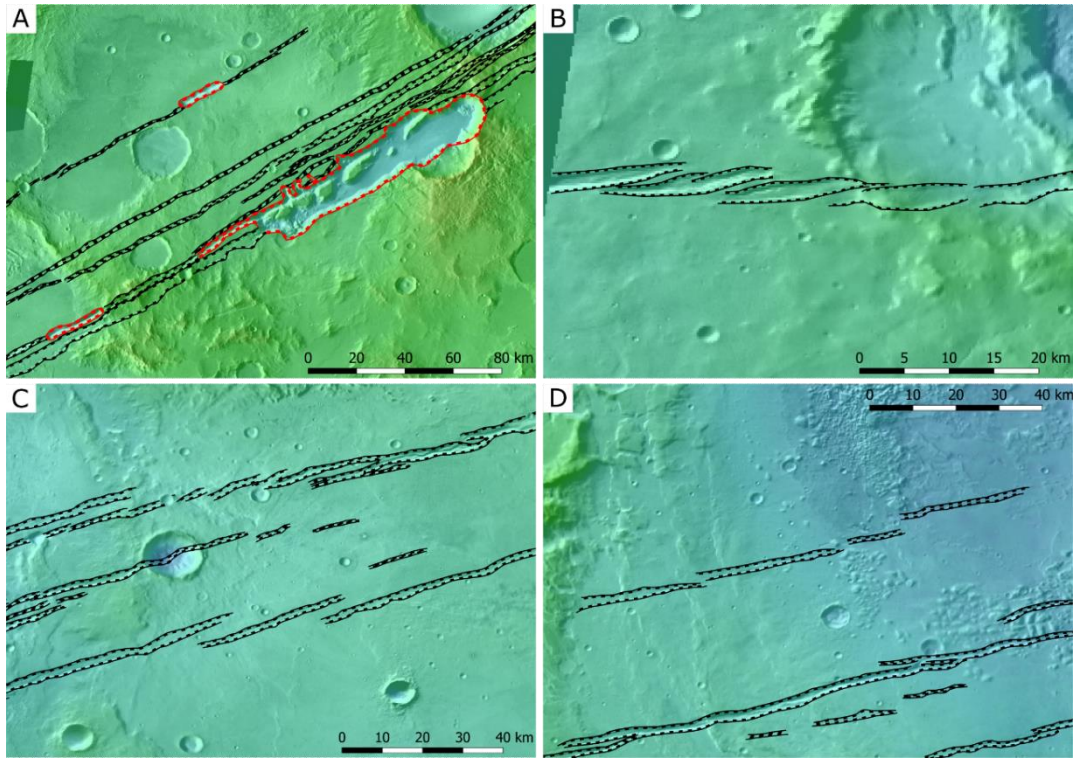


Figura 6. A) En rojo, la estructura grande se reconoce como un valle o un cañón originado por la erosión del agua mientras que las estructuras más pequeñas se identifican como 'pit chains'. B) Estructuras sigmoidales de los graben a causa del relevo de los diques en profundidad. C) y D) Estructuras *en echelon* de los graben hacia la derecha y hacia la izquierda respectivamente. Líneas negras escarpes de falla normal, líneas rojas escarpes modificados por procesos erosivos.

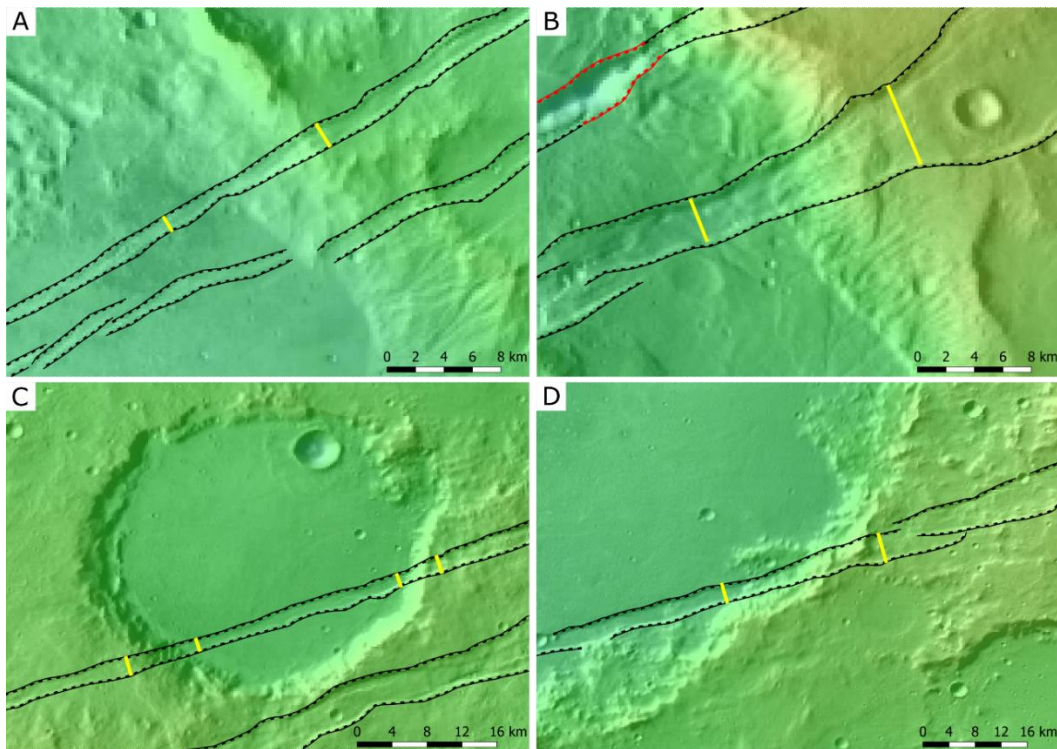


Figura 7. A) Punto de medición 1. B) Puntos de medición 2. C) Punto de medición 3 y 4. D) Punto de medición 5. (La ubicación de los puntos de medidas puede verse en el mapa general de Sirenum Fossae en la Figura 9).

de los cráteres tiene cerca de un kilómetro de profundidad (puntos 3, 4 y 5). Además, también se han medido a uno y otro lado de un escarpe con casi 2000 metros de desnivel generado por una falla inversa que levanta una cresta compresiva con una orientación perpendicular al graben (puntos 1 y 2) (Figura 7).

Los resultados del cálculo de buzamientos de las fallas se muestran en la Tabla 1. Los valores de los buzamientos se ajustan sorprendentemente bien a la aproximación de 55° que medía Schultz et al. (2010) en las fallas normales en Candor Chasma, Marte, y al valor teórico de 60° que se suele atribuir a fallas normales, cuyo buzamiento fue el empleado para el cálculo del balanceo de áreas en Rivas-Dorado et al. (2021).

Tabla 1. Cálculo del buzamiento de las fallas normales.

Punto de medición	1	2	3	4	5
W_1 (m)	1817	5982	2040	2175	4266
W_2 (m)	1127	3271	1458	1434	2887
h (m)	734	1869	592	706	1183
β (°)	64,825	54,048	63,823	62,310	59,765

Los buzamientos de la Tabla 1 se han empleado en el cálculo del balanceo de áreas sobre los perfiles transversales que pertenezcan al mismo graben donde se ha realizado la medida del buzamiento y, en caso de no haber sido posible medir el buzamiento de las fallas de un cierto graben se asume un buzamiento igual al de un graben cercano con las mismas características superficiales y parámetros similares (anchura, profundidad y elevación a la que se encuentra).

4.3. Modelado estructural de los diques

Los perfiles que se han escogido para el cálculo de los parámetros a través del balanceo de áreas se han medido sobre el modelo digital del terreno MOLA-HRSC. Se han escogido perfiles en los que no se haya producido una erosión evidente, donde los saltos de las fallas a ambos lados del graben no tengan una fuerte asimetría y donde el relieve fuera del graben es lo más llano posible (Figura 8) para reducir fuentes de error en el método del balanceo de áreas. También se ha tenido en cuenta la bajada de resolución de los datos de la elevación en las zonas donde no hay información del HRSC, por lo que en algunas zonas no ha sido posible tomar medidas de los graben.

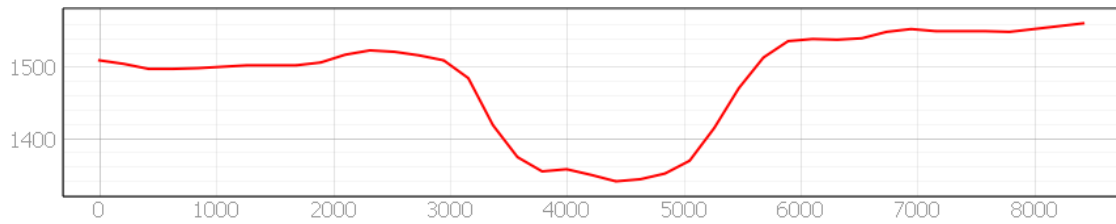


Figura 8. Ejemplo de un perfil transversal de un graben de Sirenum Fossae escogido para realizar las medidas donde el relieve fuera del graben es llano y el salto de ambas fallas es simétrico.

Varios perfiles presentan una asimetría en la concavidad del terreno a uno y otro lado del graben (Figura 9). Como explican Goudy y Schultz (2005) en sus análisis de los graben al sur de Arsia Mons, esta asimetría puede reflejar la influencia de la intrusión forzada en el origen del graben, mientras que si la topografía a ambos lados es simétrica y cóncava hacia arriba el graben estaría inducido por fallas y no por el dique. Sin embargo, Goudy y Schultz (2005) no contemplan la posibilidad de que, gracias a los esfuerzos extensionales regionales, los diques pueden intruir de forma pasiva y, graben simétricos y topografía a los lados cóncava hacia arriba también pueden albergar un dique en profundidad.

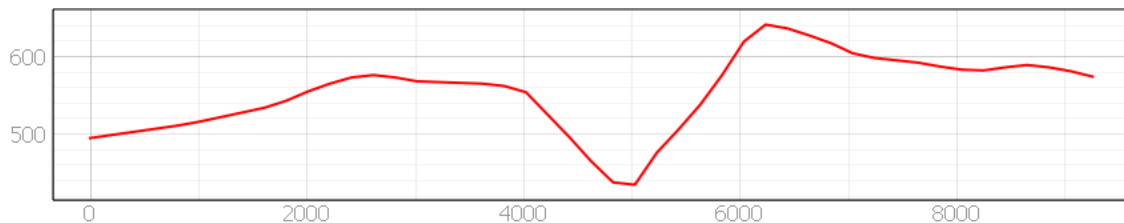


Figura 9. Ejemplo de un perfil transversal de un graben de Sirenum Fossae donde se aprecia la asimetría en la concavidad de la topografía a ambos lados de la estructura (a la izquierda cóncava hacia abajo y a la derecha cóncava hacia arriba). También se aprecia una asimetría importante en el salto de las fallas normales que limitan el graben.

Los graben en los que se han realizado los perfiles se han identificado en números del 1 al 10 (Figura 10). Los perfiles seleccionados han sido 44 y se han separado y analizado según el graben al que correspondan (Figura 10). Los resultados del balanceo de áreas incluyendo las profundidades del ápice superior y la potencia del dique se muestran a lo largo de dos sectores (primera mitad NE y segunda mitad SW de Sirenum) (Figuras 11 y 12).

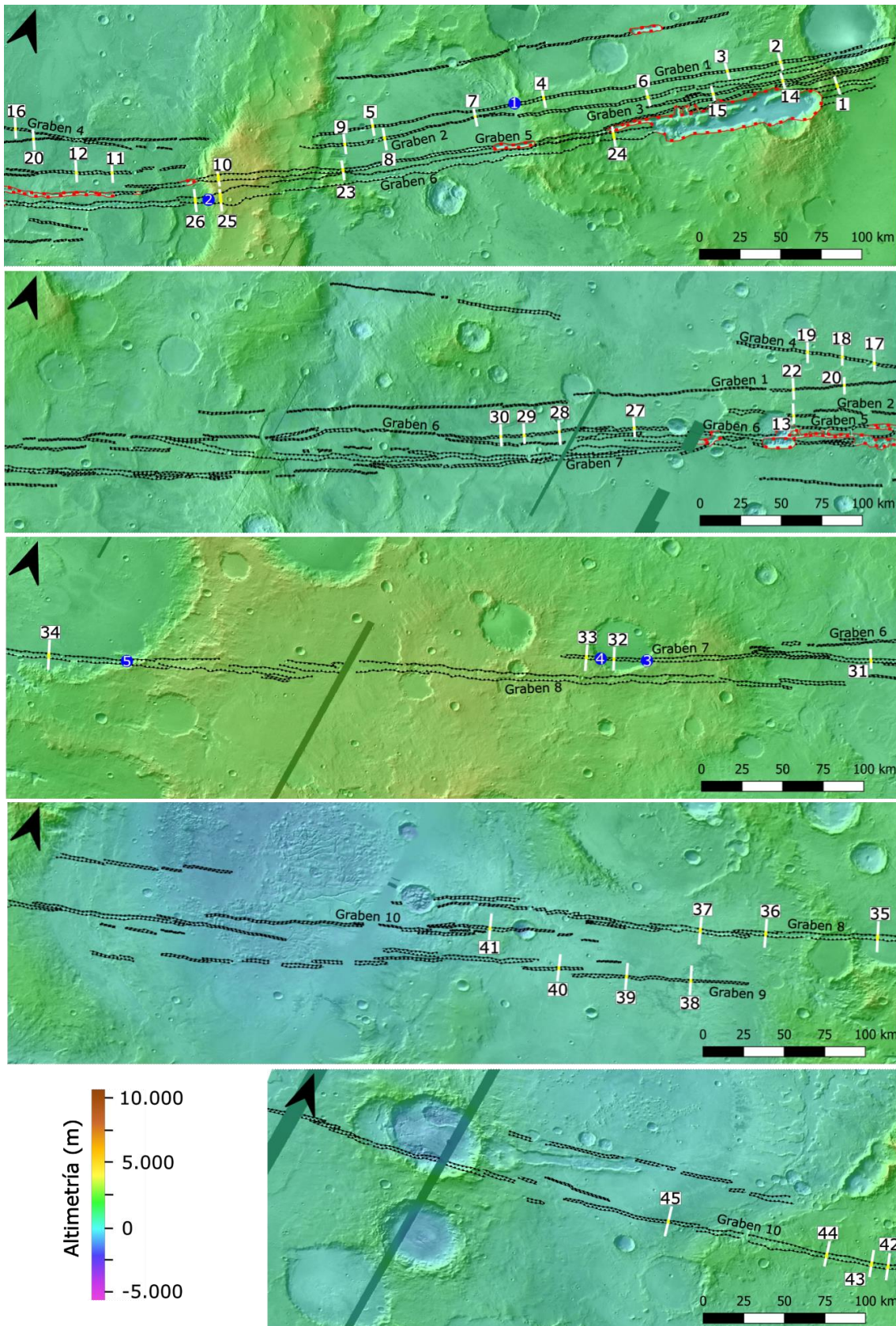


Figura 10. Imágenes de Sirenum Fossae (la escala de colores se corresponde con la topografía MOLA-HRSC y los grises con la imagen de THEMIS diurno) en las que se muestra la cartografía de las fallas, la numeración de los grabens, los perfiles transversales seleccionados y, en azul, los puntos de medición de los buzamientos. El norte está girado 20 grados al Este.

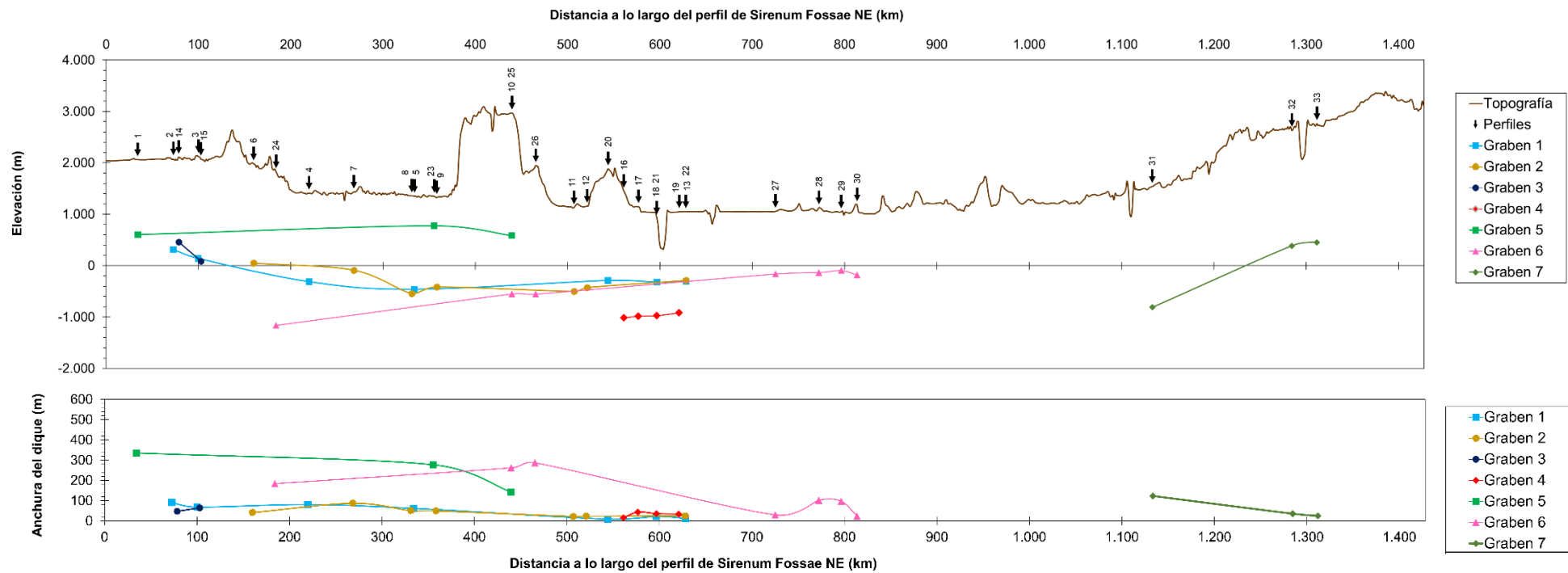


Figura 11. Resultados de la sección NE del perfil topográfico a lo largo de Sirenum Fossae en el que se muestra la profundidad del ápice superior y anchura del dique bajo la ubicación del perfil transversal correspondiente en el que se ha realizado el balanceo de áreas. La fuente del magma, Arsia Mons, está ubicada a la izquierda.

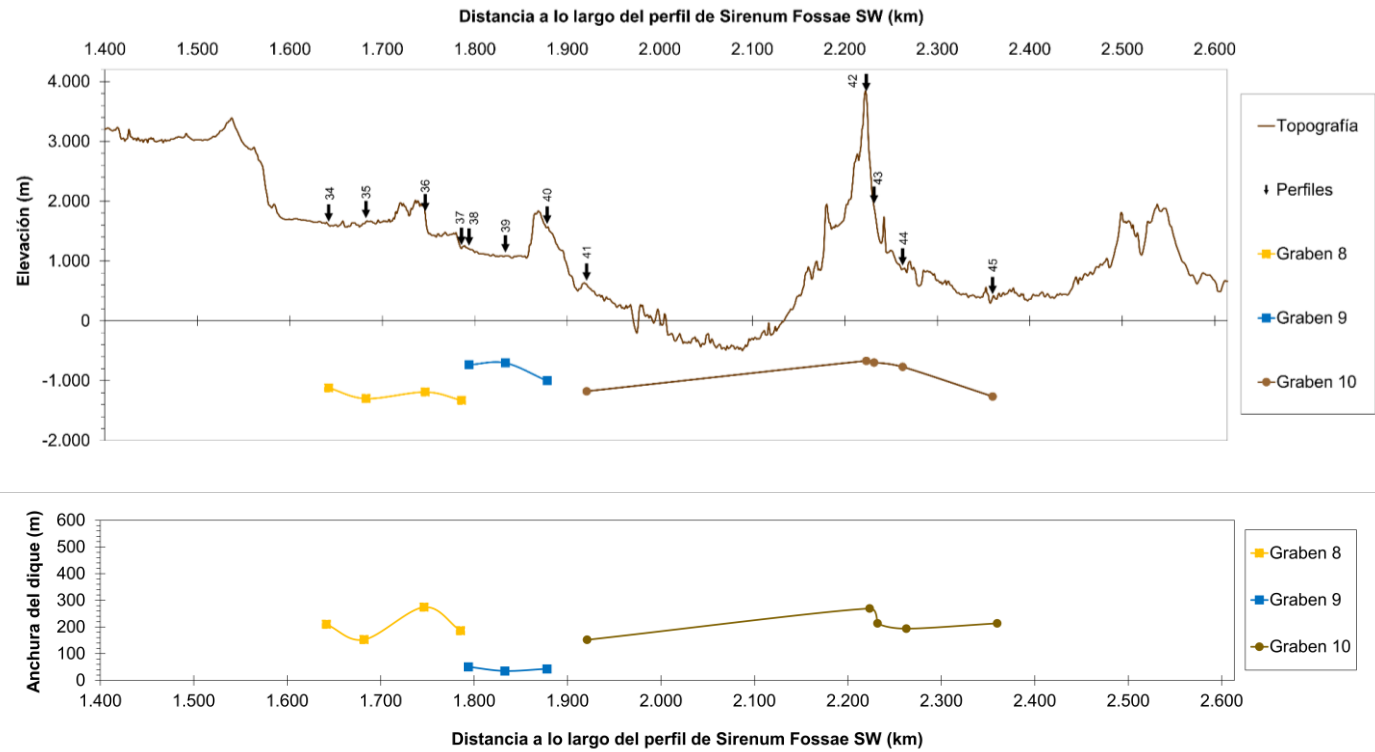


Figura 12. Resultados de la sección SW del perfil topográfico a lo largo de Sirenum Fossae en el que se muestra la profundidad del ápice superior y anchura del dique bajo la ubicación del perfil transversal correspondiente en el que se ha realizado el balanceo de áreas. La fuente del magma, Arsia Mons, está ubicada a la izquierda.

La media de las anchuras modeladas de los diques es de 105 metros. Las mayores anchuras, 335 y 287, corresponden a los graben 6 y 5 respectivamente, los cuales son los de mayor longitud del sistema. Asumimos que los diques tienen la misma longitud que el graben inducido por encima. En las Figuras 11 y 12, se observa en muchos casos morfologías como las que se describen en Rivas-Dorado et al. (2021) en diques de Elysium. Se tratan de diques con una geometría de tipo raíz, cuello y cabeza (Figura 13). Las zonas de somerización hacia el SW pueden ser el paso del cuello a la cabeza, mientras que las zonas de profundización hacia el SW cerca de Arsia Mons puede tratarse del paso de la raíz (término que se refiere a la zona del dique más cercana a la fuente) al cuello.

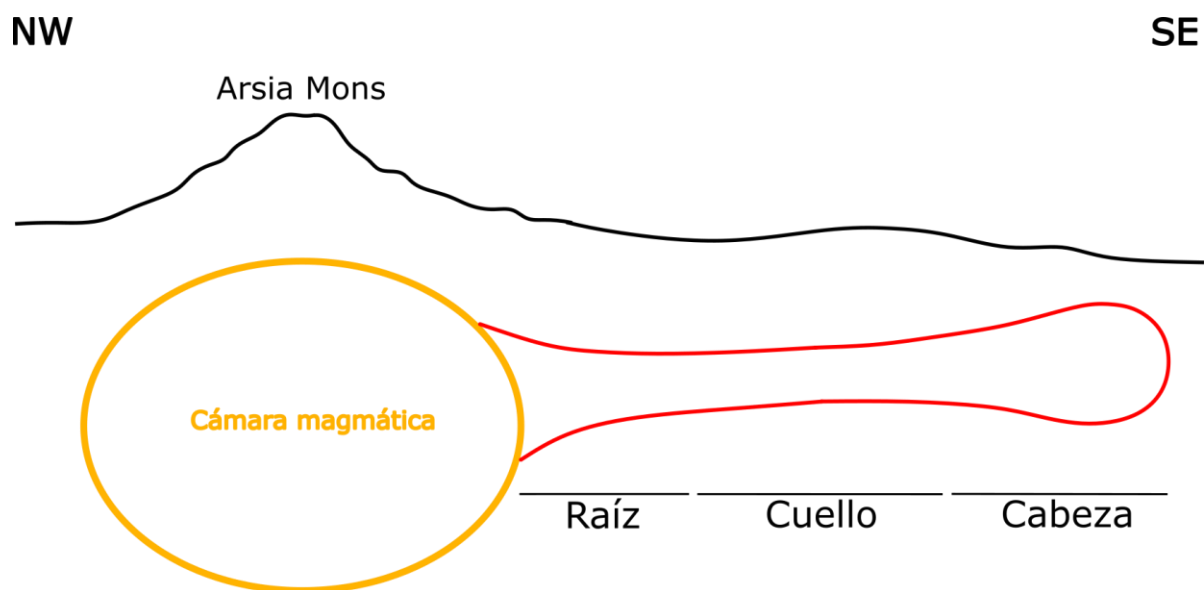


Figura 13. Modelo de la morfología de los diques en profundidad con geometría de tipo raíz, cuello y cabeza.

En el sector NE (Figura 11) se pueden dividir los graben en dos ramas que, aparte de tener unos parámetros modelados de los diques parecidos, también se agrupan espacialmente entre sí en la superficie (Figura 11a): los graben 1, 2, 3 y 4 se encuentran muy cercanos entre ellos, con unos parámetros de los grabens y características estructurales muy parecidas además de profundidades y anchuras modeladas de los diques dentro de un rango similar. A diferencia de estos cuatro graben, los graben 5 y 6 se encuentran agrupados y algo más alejados de los primeros. Éstos, al igual que la otra rama, tienen características semejantes siendo más anchos, con diques más someros y mayores aperturas. Además, las relaciones geomorfológicas de los graben 5 y 6 y la progresión de las anchuras de los diques de los graben 5 y 6 señalan su convergencia en profundidad.

Rubin y Pollard (1988) y Rubin (1992), encontraron que existe una relación entre la profundidad del ápice superior dique y del graben inducido, así como, entre la anchura del dique y la profundidad del graben. La Figura 14 muestra la relación entre la anchura y la profundidad del graben, con los parámetros modelados del dique, su profundidad y anchura, respectivamente, a partir del método del balanceo de áreas. La anchura del graben con respecto a la profundidad del dique muestra una relación lineal que resulta lógica si tenemos en cuenta que las fallas normales conjugadas se nuclean sobre el ápice (Rivas-Dorado et al., 2023) con buzamientos en torno a 60° y, por lo tanto, a mayores profundidades del ápice superior los graben inducidos serán necesariamente más anchos en superficie.

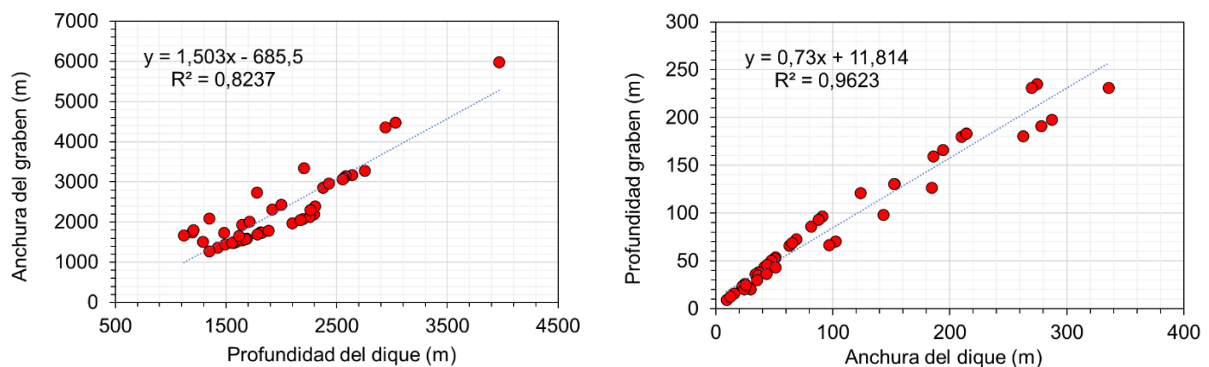


Figura 14. Izquierda, relación lineal de la anchura del graben en función de la profundidad del dique. Derecha, variación de la profundidad del graben respecto a la anchura del dique.

A diferencia de las ratios modeladas por Rubin (1992) en graben inducidos por diques en Islandia y las cuales fueron aplicadas por Scott et al. (2002) en sistemas de graben en Alba Patera, la relación entre las anchuras medidas de los graben respecto a las profundidades modeladas de los diques de Sirenum Fossae son menores (algo más de 1) en relación al 3,5 de Rubin (1992). Esto resulta en profundidades de los diques mayores a las resultantes con las ratios de Rubin (1992). Sin embargo, la relaciones entre la anchura del graben y la profundidad del dique no difieren tanto con la dada por Rubin (1992), acercándose ambas ratios a 1.

Rivas-Dorado et al. (2021) sugirieron una relación entre la anchura del dique y la anchura de graben que no se había descrito anteriormente en otros artículos. En dicho artículo, se presenta un gráfico con una relación exponencial entre la apertura del dique modelada respecto a la anchura del graben con los datos del sistema de diques de Elysium Fossae. La relación entre ambos parámetros, pero con los ejes invertidos respecto al gráfico de Rivas-Dorado et al. (2021), se presenta en la Figura 15 donde en el eje x se representa la variable independiente (la anchura del dique) y, en el eje Y, la variable dependiente (anchura

del graben). Los parámetros de Elysium tienen una relación exponencial con un coeficiente de determinación de 0,53 mientras que el coeficiente de determinación de los parámetros de Sirenum es 0,4424.

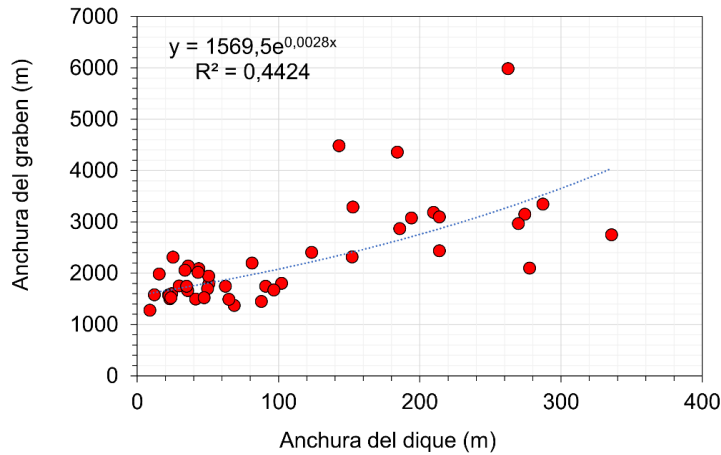


Figura 15. Gráfico comparativo entre las anchuras de los graben respecto a las anchuras de los diques de Sirenum.

Si se comparan las ratios anchura del graben-anchura del dique de Sirenum Fossae con los que obtuvieron Rivas-Dorado et al. (2021) y Rivas-Dorado et al. (2002) en Elysium Fossae y Cerberus Fossae (Figura 16), se puede deducir que hay una tendencia en que la anchura del graben sea mayor cuanto mayor sea la apertura del dique. Esto supondría que la anchura del graben no sólo está influenciada por la profundidad a la que se encuentra el ápice del dique, sino que también guardaría correlación con el ancho del dique, lo cual es lógico dado que al abrirse el dique el graben inducido se va a ensanchar necesariamente durante su génesis en una distancia exactamente igual a la apertura del dique.

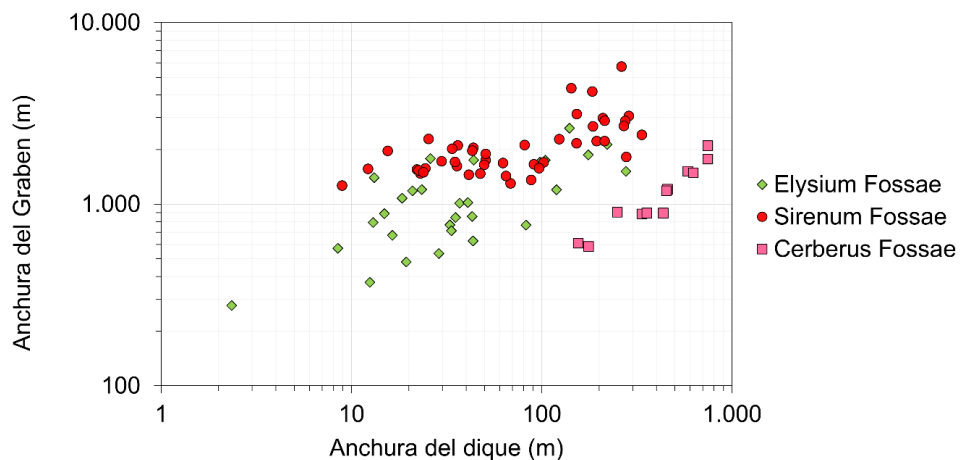


Figura 16. Gráfico comparativo entre las anchuras de los graben respecto a las aperturas de los diques de Elysium Fossae, Cerberus Fossae y Sirenum Fossae. Se puede observar una tendencia parecida en los tres sistemas.

Por último, se midieron las longitudes de cada dique asumiendo dicha longitud igual a la del respectivo graben inducido. Los segmentos de graben que tienen un espaciado menor al 10% del largo total del dique se analizan como un mismo graben. Estas longitudes se compararon con la apertura del dique, ya que numerosos estudios comprueban la relación sistemática que se produce en el aumento de la apertura del dique con respecto a su longitud (Schultz et al., 1997), lo cual es típico de fracturas inducidas por fluidos. En la Figura 17 se muestran los resultados obtenidos comparándolos con diques terrestres y con otros sistemas de diques de Marte.

Debido a la geometría segmentada *en echelon* de los graben, las ratios de las anchuras respecto a la longitud total del dique pueden ser ligeramente menores de lo que cabría esperarse si se utilizara la longitud real del segmento, puesto que esta condición influencia las profundidades de los graben y, por lo tanto, la apertura de los diques (Goudy y Schultz, 2005). Sin embargo, a pesar de este carácter, la Figura 17 muestra cómo la ratio A/L de Sirenum Fossae encaja con la tendencia marciana y terrestre. Este gráfico, además, respaldaría el uso del método del balanceo de áreas en graben inducidos por diques puesto que los resultados de las aperturas son coherentes y razonables con las esperadas para fracturas inducidas por fluidos.

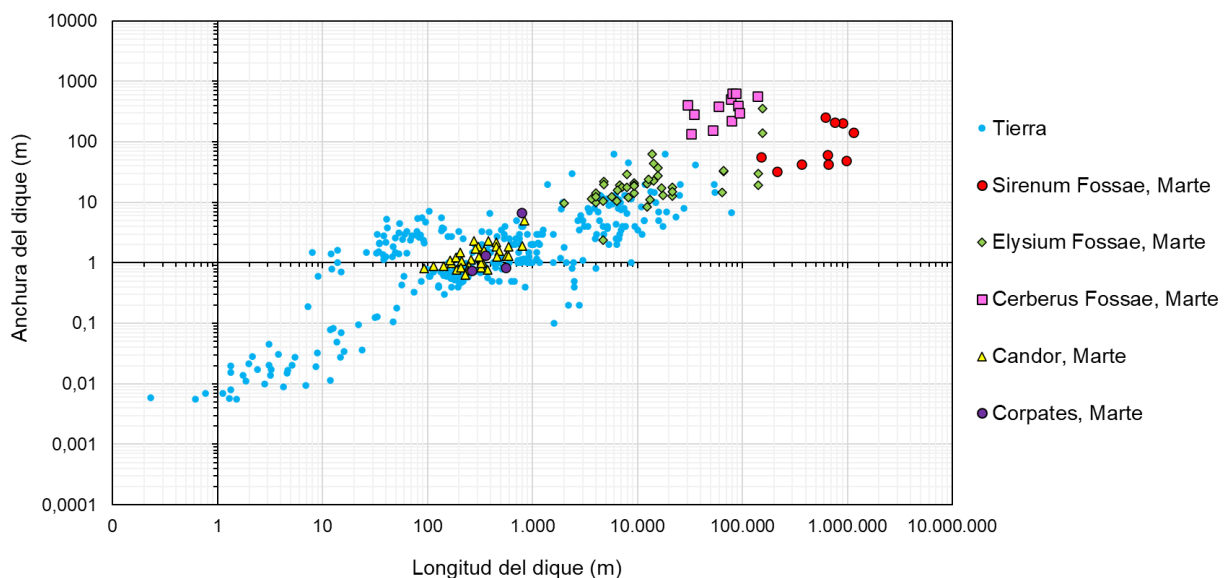


Figura 17. Relación de aspecto entre apertura del dique respecto a su longitud de Sirenum Fossae y otros sistemas de diques de Marte y de la Tierra.

En cualquier caso, los diques de Sirenum Fossae son más estrechos de lo esperado para las longitudes que tienen. Rivas-Dorado et al. (2022) explican que las grandes anchuras

de los diques de Cerberus Fossae respecto a su longitud pueden estar favorecidas por un encajante débil y por magmas viscosos bajo condiciones de alta presión. Así, en el caso de los diques estrechos de Sirenum, puede deberse a que la intrusión se emplaza en un encajante más competente que ofrece más resistencia a la apertura de la fisura.

A pesar de los diversos sistemas de diques de Marte, cada uno tiene características geométricas diferentes y, como se puede ver en las longitudes de la Figura 17, los diques de Sirenum se caracterizan por su longitud. Considerando que Tharsis es la provincia volcánica más grande de Marte y los eventos intrusivos son directamente proporcionales a la magnitud de su actividad magmática, su extrema largura puede ser la consecuencia de una persistente y continua presión magmática o bien por reiterados pulsos que van abriendo las fracturas paulatinamente durante un largo periodo de tiempo.

4.4. Implicaciones en la futura exploración de recursos minerales

Sirenum Fossae puede considerarse una gran provincia ígnea (Large Igneous Province, LIP, en inglés) debido a las magnitudes de los diques modelados. Los LIPs tienen gran importancia económica en el mundo de la exploración por contener mineralizaciones o por estar envueltas directamente sobre la formación de éstas (Ernst y Jowitt, 2013). Esto se debe a que los gigantes volúmenes de magmas que se transfieren por las grietas pueden ser la fuente de calor, metales y fluidos mineralizadores necesaria para la formación de yacimientos (Ernst y Jowitt, 2013). Generalmente, los depósitos que se atribuyen a los LIPs se generan a partir de un magma máfico-ultramáfico como, por ejemplo, los yacimientos de Ni-Cu-PGE, Fe-Ti-V y Cr (Ernst y Jowitt, 2013). Sin embargo, para conocer los posibles tipos de mineralizaciones de Sirenum, sería necesario un estudio litológico del complejo tanto de la roca encajante, la cual puede proporcionar elementos durante su fusión por el contacto con la intrusión (Barnes y Mungall, 2018), como conocer el tipo de magma que intruye.

Los diques someros serían los más viables durante la explotación por su mayor accesibilidad. Rivas-Dorado et al. (2023) explican la presencia de pequeñas grietas y fisuras subverticales abiertas sobre el ápice del dique en sistemas de diques de Marte debido a los esfuerzos conjugados de los esfuerzos litostáticos y los esfuerzos inducidos por la intrusión. Ambos esfuerzos labran una tensión vertical máxima por encima del dique y que es la causa de la presencia de estas grietas sobre el dique cercanas a la superficie. Estas grietas son lugares favorables para la acumulación de fluidos residuales con alta capacidad de formar mineralizaciones, por lixiviación, oxidación o precipitación, entre otros.

También es importante reconocer que las ratios anchura-longitud de diques y venas terrestres se conservan en Marte. Esto permite una predicción de las aperturas de los diques

y, por tanto, las dimensiones de la intrusión cuyo conocimiento mejora la evaluación de la posible explotación.

5. Conclusiones

Los parámetros modelados de los diques con el método del balanceo de áreas son razonables para las magnitudes de los graben que inducen. Por un lado, la media de las aperturas es de 106,92 m, siendo los valores más pequeños correspondientes a los graben menos profundos (decenas de metros) y los mayores valores, cuya apertura máxima es 335,79 m, corresponden a los graben más profundos, de hasta 231,50 m.

El promedio de las longitudes de los diques es 730,41 m. La relación de las aperturas respecto a estas longitudes de los diques coincide con la tendencia terrestre y marciana de diques, lo que permite predecir las dimensiones de los diques en profundidad. Sin embargo, la ratio anchura-longitud de los diques es ligeramente menor si los comparamos con las ratios de otros sistemas de diques. Este hecho es interpretado como consecuencia a una roca encajante competente junto con una presión magmática sostenida en el tiempo que haya sido capaz de alimentar los diques hasta conseguir su gran longitud actual.

Por otro lado, los resultados de los buzamientos calculados de las fallas normales que limitan los graben rondan los 60°, valor teórico deducido por la mecánica de rocas para fallas generadas por un régimen tectónico extensional.

Respecto a la geometría y estructura de los diques, los resultados variantes de las profundidades de los diques, con una media cercana a los 2 km, a lo largo del perfil del sistema pueden sugerir una morfología de los diques de tipo raíz, cuello y cabeza donde las zonas más someras pertenecerían a la parte de la cabeza (zona distal a la fuente). Las zonas someras son las más interesantes bajo un punto de vista exploratorio ya que reducen la complejidad de la infraestructura de extracción y fallos durante la maniobra, por lo que, las profundidades modeladas más bajas serían el foco en una explotación económicamente rentable y más sencilla.

6. Bibliografía

Anderson, R. C., Dohm, J. M, Golombek, M. P., Haldemann, A. F. C., Franklin, B. J., Tanaka, K. L., Lias, J. y Peer, B. (2001): "Primary Centers and Secondary Concentrations of Tectonic Activity through Time in the Western Hemisphere of Mars". *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E9), pp. 20563–20585. doi: 10.1029/2000JE001278.

- Anderson, R. C., Dohm, J. M., Robbins, S., Hynek, B. y Andrews-Hanna, J. (2012): "Terra Sirenum: Window into pre-Tharsis and Tharsis Phases of Mars Evolution". *Lunar and Planetary Conference*, 43.
- Anderson, R. C., Dohm, J. M., Williams, J. P., Robbins, S. J., Siwabessy, A., Golombek, M. P. y Schroeder, J. F. (2019): "Unraveling the geologic and tectonic history of the Memnonia-Sirenum region of Mars: Implications on the early formation of the Tharsis rise". *Icarus*, 332, pp. 132-150. doi: 10.1016/j.icarus.2019.06.010.
- Barnes, S. J. y Mungall, J. E. (2018): "Blade-shaped dikes and nickel sulfide deposits: a model for the emplacement of ore-bearing small intrusions". *Economic Geology*, 113(3), pp. 789–798.
- Bouley, S., Baratoux, D., Paulien, N., Missenard, Y. y Saint-Bézar, B. (2018): "The revised tectonic history of Tharsis". *Earth and Planetary Sciences Letters*, 488, pp. 126-133.
- Broquet, A. and Andrews-Hanna, J. C. (2022): "Geophysical Evidence for an Active Mantle Plume underneath Elysium Planitia on Mars". *Nature Astronomy*, 7(2), pp. 160–169. doi: 10.1038/s41550-022-01836-3.
- Broquet, A. and Andrews-Hanna, J. C. (2023): "Plume-Induced Flood Basalts on Hesperian Mars: An Investigation of Hesperia Planum". *Icarus*, 391. doi: 10.1016/j.icarus.2022.115338.
- Capitan, R. D. and Van De Wiel, M. (2011): "Landform Hierarchy and Evolution in Gorgonum and Atlantis Basins, Mars". *Icarus*, 211(1), pp. 366–388. doi: 10.1016/j.icarus.2010.08.006.
- Chadwick, W. W. and Embley, R. W. (1998): "Graben Formation Associated with Recent Dike Intrusions and Volcanic Eruptions on the Mid-Ocean Ridge". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B5), pp. 9807–9825. doi: 10.1029/97JB02485.
- Contreras, J., Yarbuh, I. and Lotero-Vélez, A. (2016): "Derivation of the Area Balance Relations of Detachment Folds from First Principles". *Marine and Petroleum Geology*, 78, pp. 247–253. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2016.09.015.
- Crane, L. (2022): "Huge plume of rising hot rocks may be shaking mars". *New Scientist*, 256(3416), pp. 10-10.
- Crown, D. A. and Ramsey, M. S. (2017): "Morphologic and Thermophysical Characteristics of Lava Flows Southwest of Arsia Mons, Mars," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 342, pp. 13–28. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2016.07.008.
- Demidov, N. E., Boynton, W. V., Gilichinsky, D. A., Zuber, M. T., Kozyrev, A. S., Litvak, M. L., Mitrofanov, I. G., Sanin, A. B., Saunders, R. S., Smith, D. E., Tretyakov, V. I. y Hamara, D. (2008): "Water distribution in martian permafrost regions from joint análisis of Hend (Mars Odyssey) and MOLA (Mars Global Surveyor) data". *Astronomy Letters*, 34(10), pp. 713-723. doi: 10.1134/S1063773708100071.

- Drymoni, K., Russo, E., Alessandro, T., Corti, N., Bonali, F. L. y Mariotto, F. P. (2023): "Dyke-Induced Graben Formation in a Heterogeneous Succession on Mt. Etna: Insights from Field Observations and Fem Numerical Models". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 433. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2022.107712.
- Edwards, C. S., Christensen, P. R. and Hill, J. (2011): "Mosaicking of Global Planetary Image Datasets: 2. Modeling of Wind Streak Thicknesses Observed in Thermal Emission Imaging System (themis) Daytime and Nighttime Infrared Data," *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E10). doi: 10.1029/2011JE003857.
- Ernst, R. E., Grosfils, E. B. y Mège, D. (2001): "Giant mafic dike swarms on Earth, Venus and Mars". *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, 29, pp.489-534.
- Ernst, R. y Jowitt, S. (2013): "Large Igneous Provinces (LIPs) and Metallogeny". *Society of Economic Geologists, Inc.*, pp.17-51.
- Ferrill, D. A., Wyrick, D. Y. and Smart, K. J. (2011): "Coseismic, Dilational-Fault and Extension-Fracture Related Pit Chain Formation in Iceland; Analog for Pit Chains on Mars". *Lithosphere*, 3(2), pp. 133–142. doi: 10.1130/L123.1.
- Goudy, C. L. y Schultz, R. A. (2005): "Dike intrusions beneath grabens south of Arsia Mons, Mars". *Geophysical Research Letters*, 32(5), 1-3. doi: 10.1029/2004GL021977.
- Groshong, R. H. (2019): "Area-Constant Strain and Dilation in Sandbox Models: Insights from Whole-Model Area Balance". *Journal of Structural Geology*, 118, pp. 279–283. doi: 10.1016/j.jsg.2018.11.003.
- Haack, D., Adeli, S. and Hauber, E. (2021): "Geological History of Southeastern Gorgonum Chaos, Mars: A Story of Water and Wind". *Journal of geophysical research. Planets*, 126(9).
- Hardy, S. (2016): "Does Shallow Dike Intrusion and Widening Remain a Possible Mechanism for Graben Formation on Mars?". *Geology (Boulder)*, 44(2), pp. 107–110. doi: 10.1130/G37285.1.
- Head, J. W. and Wilson, L. (1993): "Lunar Graben Formation Due to Near-Surface Deformation Accompanying Dike Emplacement". *Planetary and Space Science*, 41(10), pp. 719–727. doi: 10.1016/0032-0633(93)90114-H.
- Hjartardóttir, Á. R., Einarsson, P., Gudmundsson, M. T y Högnadóttir, T. (2016): "Fracture Movements and Graben Subsidence during the 2014 Bárðarbunga Dike Intrusion in Iceland". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 310, pp. 242–252. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.12.002.
- Himematsu, Y. and Furuya, M. (2020): "Rift-Parallel Block-Like Motion of the Graben Floor during the 2005-2010 Afar Rifting Episode". *Tectonophysics*, 791. doi: 10.1016/j.tecto.2020.228571.

- Howard, A. D. and Moore, J. M. (2011): "Late Hesperian to Early Amazonian Midlatitude Martian Valleys: Evidence from Newton and Gorgonum Basins". *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E5). doi: 10.1029/2010JE003782.
- Jaumann, R., Neukum, G., Behnke, T., Duxbury, T. C., Eichentopf, K., Flohrer, J., Gasselt, S. V., Giese, B., Gwinner, K., Hauber, E., Hoffmann, H., Hoffmeister, A., Köhler, U., Mats, K. D., McCord, T. B., Mertens, V., Oberst, J., Pischel, R., Reiss, D., Ress, E. y Wählisch, M. (2007): "The high-resolution stereo camera (HRSC) experiment on Mars Express: Instrument aspects and experiment conduct from interplanetary cruise through the nominal misión". *Planetary and Space Science*, 55(7-8), pp. 928-952
- Jehl, A., Pinet, P. C., Cord, A., Daydou, Y. D., Baratoux, D., Chevrel, S. C., Manaud, N., Greeley, R., Kreslavsky, M. A., Raitala, J., Hoffman, H., Gwinner, K., Scholten, F., Roatsch, T., Jaumann, R., Neukum, G. y the Mars Express HRSC Co-Investigator team. (2006): "Improved Surface photometric mapping across Gusev and Apollinaris from an HRSC/Mars Express integrated multi-orbit dataset: Implication on Hapke parameters determination". *Lunar and Planetary Science*, 37.
- Jehl, A., Pinet, P., Baratoux, D., Daydou, Y., Chevrel, S., Heuripeau, F., Manaud, N., Cord, A., Rosemberg, C., Neukum, G., Gwinner, K., Scholten, F., Hoffman, H. y Roatsch, T. (2008): "Gusev Photometric Variability As Seen from Orbit by HRSC/Mars-Express". *Icarus*, 197(2), pp. 403–428. doi: 10.1016/j.icarus.2008.05.022.
- Kakaria, R. and Yin, A. (2023): "Subglacial Catastrophic-Flood Origin of Linear and Curvilinear Flat-Rimmed Pit Chains on Mars: Evidence from Geomorphological Mapping and Detailed Landsystem Analysis". *Icarus*, 395. doi: 10.1016/j.icarus.2023.115439.
- Kneissl T *et al.* (2015): "Age Determination of Linear Surface Features Using the Buffered Crater Counting Approach - Case Studies of the Sirenum and Fortuna Fossae Graben Systems on Mars". *Icarus*, 250, pp. 384–394. doi: 10.1016/j.icarus.2014.12.008.
- Kneller, B. D., Roberts, G. P. and Grindrod, P. M. (2019): "Correlation between Graben Orientation, Channel Direction Change, and Tectonic Loading: The Elysium Province, Mars," *Journal of Geophysical Research. Planets*, 124(3), pp. 652–680. doi: 10.1029/2018JE005795.
- Krishnan, V. (2023): "Long-Lived and Continual Volcanic Eruptions, Tectonic Activity, Pit Chains Formation, and Boulder Avalanches in Northern Tharsis Region: Implications for Late Amazonian Geodynamics and Seismo-Tectonic Processes on Mars". *Journal of Geophysical Research. Planets*, 128(1). doi: 10.1029/2022JE007511.
- Magee, C. and Jackson, C. A.-L. (2021): "Can We Relate the Surface Expression of Dike-Induced Normal Faults to Subsurface Dike Geometry?". *Geology*, 49(4), pp. 366–366. doi: 10.1130/G48171.1.

- Márquez González, A., Hernández, P., de Pablo, M. A., Ozaryun, R. y Viedma, C. (2005): "Evidence of Gully Formation by Regional Groundwater Flow in the Gorgonum-Newton Region (Mars)". *Icarus*, 179(2), pp. 398–414. doi: 10.1016/j.icarus.2005.07.020.
- Martín-González, F., de Pablo, M. A. y Márquez, A. (2004): "Shear deformation in the graben systems of Sirenum Fossae, Mars". *Lunar and Planetary Science*, 35.
- Mastin, L. G., and D. D. Pollard, D.D. (1988): "Surface deformation and shallow dike intrusion processes at Inyo Craters, Long Valley, California". *Journal of Geophysical Research*, 93.
- Mège Daniel and Masson, P. (1996): "A Plume Tectonics Model for the Tharsis Province, Mars". *Planetary and Space Science*, 44(12), pp. 1499–1546. doi: 10.1016/S0032-0633(96)00113-4.
- Mège, D., Cook, A.C., Garel, E., Lagabrielle, Y. y Cormier, M.H. (2003): "Volcanic Rifting at Martian Grabens". *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E5). doi: 10.1029/2002JE001852.
- Neumann, G. A., Rowlands, D. D., Lemoine, F. G., Simth, D. E. y Zuber, M. T. (2001): "Crossover Analysis of Mars Orbiter Laser Altimeter Data". *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E10), pp. 23753–23768. doi: 10.1029/2000JE001381.
- Pinet, P. C., Jehl, A., Cord, A., Daydou, Y. D., Baratoux, D., Chevrel, S. C., Manaud, N., Greeley, R., Hoffman, H., Gwinner, K., Scholten, F., Roatsch, T., Jaumann, R., Neukum, G., Bell, J. F., Arvidson, R. E., Johnson, J. R., Squyres, S.W., the Mars Express HRSC Co-Investigator team y the MER Science Team (2006): "Mars Express/HRSC imaging photometry and MER Spirit/PAN/CAM in situ spectrophotometry Gusev". *Lunar and Planetary Science*, 37.
- Plait, P. (2023): "Volcanic Activity Surprises on Mars," *Scientific American*, 328(4), pp. 74–74.
- Podda, S., Melis, M. T., Collu, C., Demurtas, V., Perseu, F. O., Brunetti, M. T. y Scaioni, M. (2020): "New Morphometric Data of Lunar Sinuous Rilles," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13. doi: 10.1109/JSTARS.2020.3003080.
- Rivas-Dorado, S., Ruíz, J. and Romeo, I. (2021): "Subsurface geometry and emplacement conditions of a giant dike system in Elysium Fossae, Mars". *Journal of Geophysical Research. Planets*, 126(1). doi: 10.1029/2020JE006512.
- Rivas-Dorado, S., Ruíz, J. and Romeo, I. (2022): "Giant dikes and dike-induced seismicity in a weak crust underneath Cerberus Fossae, Mars". *Earth and Planetary Science Letters*, 594. doi: 10.1016/j.epsl.2022.117692.
- Rivas-Dorado, S., Ruíz, J. and Romeo, I. (2023): "Modeling of Dike-Induced Graben Nucleation in the Elysium Region, Mars: The Role of Planetary Gravity". *Journal of Structural Geology*, 167. doi: 10.1016/j.jsg.2022.104778.

- Rubin, A. M. and Pollard, D. D. (1988): "Dike-Induced Faulting in Rift Zones of Iceland and Afar," *Geology (Boulder)*, 16(5), pp. 413–417. doi: 10.1130/0091-7613(1988)016<0413:DIFIRZ>2.3.CO;2.
- Rubin, A. M. (1992): "Dike-induced faulting and graben subsidence in volcanic rift zones" *Journal of Geophysical Research*, 97(B2),1839-1858. Doi: 10.1029/91JB02170.
- Ruj, T., Komatsu, G., Schmidt, G., Karunatilake, S., & Kawai, K. (2022). "Tectonism of late noachian mars: Surface signatures from the southern highlands". *Remote Sensing*, 14(22), 5664. doi:<https://doi.org/10.3390/rs14225664>.
- Russell, P. S. and Head, J. W. (2007): "The Martian Hydrologic System: Multiple Recharge Centers at Large Volcanic Provinces and the Contribution of Snowmelt to Outflow Channel Activity," *Planetary and Space Science*, 55(3), pp. 315–332. doi: 10.1016/j.pss.2006.03.010.
- Schultz, R. A. (1997): "Displacement-length scaling for terrestrial and Martian faults: Implications for Valles Marineris and shallow planetary grabens". *Journal of Geophysical Research*, 102, pp. 12009-12015.
- Schultz, R. A., Okubo, C. H. Goudy, C. L. y Wilkins, S. J. (2004): "Igneous Dikes on Mars Revealed by Mars Orbiter Laser Altimeter Topography," *Geology (Boulder)*, 32(10), pp. 889–892. doi: 10.1130/G20548.1.
- Schultz, R. A., Hauber, E., Kattenhorn, S., Okubo, C. H. y Watters, T. R. (2010): "Interpretation and Analysis of Planetary Structures". *Journal of Structural Geology*, 32(6), pp. 855–875. doi: 10.1016/j.jsg.2009.09.005.
- Scott, E. D., Wilson, L. and Head, J. W. (2002): "Emplacement of Giant Radial Dikes in the Northern Tharsis Region of Mars". *Journal of Geophysical Research: Planets*, 107(E4), pp. 3–1. doi: 10.1029/2000JE001431.
- Smith, D. E., Zuber, M. T., Frey, H. V., Garvin, J. B., Head, J. W., Muhleman, D. O., Pettengill, G. H., Philips. R. J., Solomon, S. C., Zwally H. J., Banerdt, W. B., Duxbury, T. C., Golombek, M. P., Lemoine, F. G., Neumann, G. A., Rowlands, D. D., Aharonson, O., Ford, P. G., Ivanov A. B., Johnson, C. L., McGovern, P. J., Abshire, J. B., Afzal, R. S. y Sun, X. (2001): "Mars Orbiter Laser Altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars". *Journal of Geophysical Research*, 106(10), pp. 23689-23722.
- Smith, D. E, Zuber, M. T. y Neumann, G. A. (2003): "MOLA Precision Experiment Data Record software interface specification" (MOLA PEDR SIS). Greenbelt. NASA Goddard Space flight Center.
- Vaz, D. A., Spagnuolo, M. G. y Silvestro, S. (2014): "Morphometric and geometric characterization of normal faults on Mars". *Earth and Planetary Science Letters*, 401, 83-94. doi: 10.1016/j.epsl.2014.05.022.

- Wendt, L., Bishop, J. L. and Neukum, G. (2013): "Knob Fields in the Terra Cimmeria/terra Sirenum Region of Mars: Stratigraphy, Mineralogy and Morphology". *Icarus*, 225(1), pp. 200–215. doi: 10.1016/j.icarus.2013.03.020.
- Wilson, L. and Head, J. W. (2002): "Tharsis-Radial Graben Systems As the Surface Manifestation of Plume-Related Dike Intrusion Complexes: Models and Implications". *Journal of Geophysical Research: Planets*, 107(E8), pp. 1–1. doi: 10.1029/2001JE001593.
- Wyrick, D., Ferrill, D. A., Morris, A. P., Colton, S. L. y Sims, D. W. (2004): "Distribution, Morphology, and Origins of Martian Pit Crater Chains". *Journal of Geophysical Research: Planets*, 109(E6). doi: 10.1029/2004JE002240.
- Wyrick, D. Y. and Smart, K. J. (2009): "Dike-Induced Deformation and Martian Graben Systems". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 185(1-2), pp. 1–11. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.11.022
- Wyrick, D. Y. and Buczkowski, D. L. (2022): "Pit Crater Chains Across the Solar System: Evidence for Subterranean Tectonic Caves, Porosity and Permeability Pathways on Planetary Bodies". *Journal of Geophysical Research*.
- Xiao, H., Stark, A., Chen, H. y Oberst, J. (2022): "Recomputation and Updating of Mola Geolocation," 14(2201), pp. 2201–2201. doi: 10.3390/rs14092201.
- Xu, W., Jónsson, S., Fabio Corbi, F. y Rivalta, E.,. (2016): "Graben Formation and Dike Arrest during the 2009 Harrat Lunayyir Dike Intrusion in Saudi Arabia: Insights from Insar, Stress Calculations and Analog Experiments": *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(4), pp. 2837–2851. doi: 10.1002/2015JB012505.

7. Anexos

Perfiles	Nº graben	Buzamiento asumido (º)	Longitud Graben (km)	Anchura Graben (m)	Profundidad graben (m)	Profundidad Dique (m)	Anchura Dique (m)
1	5	54,04	612,76	2.745,39	231,50	1.776,95	335,79
2	1	64,83	977,49	1.745,52	96,75	1.808,44	90,95
3	1	64,83	977,49	1.370,59	73,00	1.421,48	68,62
4	1	64,83	977,49	2.196,84	86,50	2.293,61	81,31
5	1	64,83	977,49	1.744,32	66,50	1.822,15	62,51
6	2	64,83	659,94	1.493,17	44,00	1.565,01	41,36
7	2	64,83	659,94	1.446,48	93,50	1.490,69	87,90
8	2	64,83	659,94	1.793,81	54,00	1.881,19	50,76
9	2	64,83	659,94	1.698,75	53,00	1.780,54	49,82
10	5	54,04	612,76	4.483,28	98,50	3.029,14	142,88
11	2	64,83	659,94	1.572,26	23,50	1.660,12	22,09
12	2	64,83	659,94	1.498,66	24,50	1.581,56	23,03
13	2	64,83	659,94	1.595,98	26,00	1.684,44	24,44
14	3	64,83	151,04	1.519,39	50,50	1.591,03	47,47
15	3	64,83	151,04	1.490,98	69,00	1.551,52	64,86
16	4	64,83	215,13	1.980,46	16,50	2.098,43	15,51
17	4	64,83	215,13	2.084,61	46,50	2.194,29	43,71
18	4	64,83	215,13	2.137,55	38,50	2.254,61	36,19
19	4	64,83	215,13	2.054,45	36,00	2.167,40	33,84
20	1	64,83	977,49	1.273,41	9,50	1.348,27	8,93
21	1	64,83	977,49	1.557,44	24,00	1.644,23	22,56
22	1	64,83	977,49	1.577,41	13,00	1.671,35	12,22
23	5	54,04	612,76	2.095,72	191,50	1.348,52	277,77
24	6	54,04	1.140,70	4.356,86	127	2940,17	184,21
25	6	54,04	1.140,70	5.984,42	181,00	3.967,15	262,54
26	6	54,04	1.140,70	3.346,37	198,00	2.205,11	287,20
27	6	54,04	1.140,70	1.750,64	20,50	1.195,93	29,74
28	6	54,04	1.140,70	1.799,29	70,50	1.204,80	102,26
29	6	54,04	1.140,70	1.672,08	66,75	1.118,16	96,82
30	6	54,04	1.140,70	1.519,45	20,50	1.291,86	23,90
31	7	63,07	642,05	2.400,93	121,50	2.301,55	123,46
32	7	63,07	642,05	1.657,99	35,25	1.614,06	35,82
33	7	63,07	642,05	2.310,29	25,00	2.260,64	25,40
34	8	59,76	906,54	3.180,61	180,00	2.638,44	209,82
35	8	59,76	906,54	3.286,62	131,00	2.753,98	152,70
36	8	59,76	906,54	3.147,20	235,50	2.581,24	274,52
37	8	59,76	906,54	2.863,36	159,50	2.376,62	185,93
38	9	59,76	368,23	1.939,05	43,50	1.641,67	50,71
39	9	59,76	368,23	1.743,62	30,00	1.480,78	34,97
40	9	59,76	368,23	2.012,75	37,00	1.708,05	43,13
41	10	59,76	752,74	2.316,65	130,50	1.914,54	152,12
42	10	59,76	752,74	2.962,03	231,50	2.425,27	269,86
43	10	59,76	752,74	3.092,30	183,50	2.560,89	213,90
44	10	59,76	752,74	3.072,16	166,50	2.552,09	194,09
45	10	59,76	752,74	2.436,34	183,50	1.998,01	213,90