



ESCUELA DE
GEOLOGÍA

**EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL NOCTIS LABYRINTHUS Y SU
RELACIÓN CON LA TECTÓNICA REGIONAL DE THARSIS, MARTE**

Memoria entregada a la Universidad Mayor en cumplimiento de los requisitos para
optar al Título de Geólogo.

NICOLE NATALIE RICHARDS GUILLOU

Profesor guía:

MATÍAS ALBERTO PEÑA GÓMEZ

Miembros de la Comisión Evaluadora del Examen

RODRIGO ADOLFO QUIROGA CARRASCO
MAURO GABRIEL SPAGNUOLO

SANTIAGO, CHILE

JULIO, 2023

Abstract

Several studies have been carried out on Mars in recent decades and, although there is the clear limitation of distance, these have been increasingly detailed thanks to the new technologies and techniques implemented in terms of obtaining satellite images, together with the different methods for obtaining data such as elevation, temperature, gravity, climate, trace gases, etc. All of these have been obtained thanks to different missions launched to Mars, such as Mariner, Viking, Mars Pathfinder, Trace Gas Orbiter, Mars Express, Perseverance, among many others. However, although there is a wide variety of studies on the red planet, there are still many specific areas that lack detailed studies, especially in terms of tectonic/structural evolution. Moreover, in some areas there are controversies concerning the origin and direction of the different deformations. This is the case within the Tharsis region, specifically at Noctis Labyrinthus.

Despite being a complex area, the analysis of the DEM (Digital Elevation Model) of MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter), together with CTX (Context Camera) and HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) images, allowed us to speculate in this study on a rather tectonic origin, as well as to clarify the temporality of the deformation field. It was even possible to establish that the deformation direction that resulted in the formation of the Noctis Labyrinthus is mainly NNE-SSW and is associated with the Valles Marineris. In turn, the use of crater counting methodology helped to establish more specifically not only the temporality of these deformation fields, but also a more specific epoch for the formation of this area, probably older than previously considered.

It is within this analysis that structures were found that are often more particular to Mars, such as pit crater chains, as well as structures that may be more commonly observed on Earth, such as pull-apart basins, en echelon basins, graben, horst or even strike-slip faults. A particularity of Mars is that the scales of the structures tend to be more exaggerated than on Earth, so that within the basins analysed, there are basins up to 4km deep from their depocentre.

Analogues to the Earth were considered by means of the information already provided by satellite imagery and elevation models. This led to various proposals for understanding the formation of the Noctis Labyrinthus, such as the formation of the Himalayas, the African Rift, the Puna Plateau or the Basin and Range.

Based on further comparison with these Earth-documented analogues, in addition to structural studies from the images, the Noctis Labyrinthus was considered as an extensional zone, influenced by the Valles Marineris. By performing a regional-scale analysis, Noctis Labyrinthus is placed as part of a tectonic model involving the formation of the Thaumasia Plateau as a counterpart of the structural and kinematic evolution of the Arabian Plate on Earth.

Resumen

Varios estudios se han realizado sobre Marte en las últimas décadas y, si bien está la clara limitante de la distancia, estos han sido cada vez más detallados gracias a las nuevas tecnologías y técnicas implementadas en cuanto a la obtención de imágenes satelitales respecta, en conjunto a los distintos métodos de obtención de datos como elevación, temperatura, gravedad, clima, gases traza, etc. Todos estos obtenidos gracias a distintas misiones lanzadas a Marte, como las Mariner, Viking, Mars Pathfinder, Trace Gas Orbiter, Mars Express, Perseverance, entre muchas otras. Sin embargo, aunque hay una gran variedad de estudios sobre el planeta rojo, aún quedan muchas zonas específicas que carecen de estudios detallados, en especial en lo que respecta a la evolución tectónica/estructural. Por otra parte, en algunas zonas existen controversias referentes al origen y dirección de las distintas deformaciones. Esto es algo que ocurre dentro de la región de Tharsis, específicamente, en Noctis Labyrinthus.

A pesar de ser una zona compleja, el análisis a partir del DEM (Digital Elevation Model) de MOLA (Mars Orbiter Laser Altimeter), aunado con imágenes CTX (Context Camera) y HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment), permitió especular en este estudio un origen más bien tectónico, además de dar luces sobre una temporalidad del campo de deformación. Incluso se pudo establecer que la dirección de deformación que resultó en la formación del Noctis Labyrinthus es principalmente NNE-SSW y está asociada al Valles Marineris. A su vez, el uso de la metodología de conteo de cráteres ayudó a establecer de manera más específica no sólo la temporalidad de estos campos de deformación, sino también una época más específica para la formación de esta zona, probablemente más antigua de lo que se consideraba en estudios anteriores.

Dentro de este análisis es que se hallaron estructuras muchas veces más particulares de Marte, como las cadenas de cráteres, además de estructuras que pueden observarse más comúnmente en la Tierra, como cuencas pull-apart, cuencas en echelón, graben, horst o incluso fallas de rumbo. Una particularidad de Marte es que las escalas de las estructuras tienden a ser más exageradas que en la Tierra, por lo que dentro de las cuencas analizadas, las hay de hasta 4km de profundidad desde su depocentro.

Se consideraron análogos a la Tierra por medio de la información que ya nos otorgan las imágenes satelitales y modelos de elevación. Es con esto que se presentaron variadas propuestas para entender la formación del Noctis Labyrinthus, como la formación de los Himalayas, el Rift de África, la meseta de la Puna o el Basin and Range.

Apoyándose más en la comparación con estos análogos documentados en la Tierra, además de los estudios estructurales hechos a partir de las imágenes, se consideró al Noctis Labyrinthus como una zona extensional, influenciada por el Valles Marineris. Realizando un análisis a escala regional, se logra situar al Noctis Labyrinthus como parte de un modelo tectónico que involucra la formación de la meseta de Thaumasia como un homólogo de la evolución estructural y cinemática de la Placa Arábiga en la Tierra.

Dedicatoria

A mis padres, quienes me han apoyado, guiado, creído en mí y, sobre todo, impulsado a seguir adelante en cada cosa que me he propuesto,

Rodrigo y Annette

SOLO USO ACADÉMICO

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres por todo lo que han hecho para que hoy pueda llegar aquí y por toda la paciencia que me han tenido durante todos estos años de estudio. También agradecer a mi familia en general, a todos, por estar siempre atentos y preocupados, además de siempre apoyarme y ayudarme cuando lo he necesitado de distintas maneras a lo largo de la carrera. Gracias a mis abuelos, Raúl y Sara, a mis tías Vivi y Lety y tío Felipe por haberme acogido en distintas ocasiones en sus casas cuando más lo necesitaba, en especial durante este periodo de tesis. Especial mención a mi tía Lucy, tía Cecilia, tía Eliana, tío Pedro y tío Carlos sin quienes quizás todo hubiese sido totalmente distinto.

También quiero agradecer a mis amigos de toda la vida por seguir ahí, aun apoyándonos entre nosotros como una segunda familia. Dani, Gabo, muchas gracias. Javi, te adoro. A los que conocí durante mis años de Animación Digital quienes, a pesar de seguir caminos distintos, siguen presentes y con hartos cariños, incluso a pesar de grandes distancias. Gracias Lore, Annie, Sho y Tomás. Por supuesto, también quiero agradecer a todas las grandes personas que conocí en Geología. Diría que casi por cada año conocí gente distinta, pero les agradezco a cada uno por la buena onda y apoyo, hasta por literalmente acarrearne en terreno (Don't forget, terreno de Estructural en mayo del 2018). Maca, Jorge, Fran, Gonza, Alex, Raúl, Andrés, de verdad lo pasé demasiado bien con ustedes en la carrera, en especial en los terrenos y juntas. Sergio, me ayudaste mucho, en especial al principio que fui la nueva a mitad de año, muchas gracias. Mati, si no fuese porque te las diste de chismoso con Peña, quizás ni tendría esta tesis, así que de verdad, muchas gracias. Mención honrosa a Bardo por estar ahí constantemente desde primer año, hacer que me ría de mis propias desgracias y por ser relativamente buen compañero de trabajo.

Por último, quiero agradecer a mi profe guía, Matías Peña, por darme la oportunidad de hacer este tema y confiar en mí. También los integrantes de la comisión, Rodrigo Quiroga y Mauro Spagnuolo. Los tres, durante todo el tiempo que ha durado este proceso, han sido muy buena onda, buenos mentores y, creo, con una paciencia infinita. Agradezco el entusiasmo que le han puesto a esto, pues lo he notado y espero haber logrado responder acorde a eso.



Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES GENERALES	1
1.2	HIPÓTESIS	10
1.3	OBJETIVOS	10
1.3.1	<i>Objetivos generales</i>	10
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	10
1.4	UBICACIÓN	11
1.5	METODOLOGÍA	11
1.5.1	<i>Mapeo geológico</i>	11
1.5.2	<i>Extracción de datos</i>	12
1.5.3	<i>Selección de unidades principales</i>	12
1.5.4	<i>Conteo de cráteres</i>	12
1.5.5	<i>Dominios estructurales</i>	13
1.5.6	<i>Análisis geomorfológico y topográfico en base a perfiles de elevación</i>	13
2	METODOLOGÍA	15
2.1	CONTEO DE CRÁTERES	15
2.2	MAPEO ESTRUCTURAL	17
2.3	ANÁLISIS TOPOGRÁFICO Y GEOMORFOLÓGICO	19
3	MARCO GEOLÓGICO	21
3.1	UNIDADES GEOLÓGICAS	21
3.1.1	<i>Unidades Noéicas</i>	23
3.1.2	<i>Unidades Hespéricas</i>	24
3.1.3	<i>Unidades Hespéricas – Amazónicas</i>	24
3.1.4	<i>Unidades Amazónicas</i>	25
3.2	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	26
3.2.1	<i>Noctis Labyrinthus</i>	26
3.2.2	<i>Meseta de Thaumasia</i>	27
4	RESULTADOS	29
4.1	ANÁLISIS DE LINEAMIENTOS	29
4.2	ESTIMACIÓN DE EDADES	33
4.3	MAPA GEOLÓGICO	38
4.4	ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO	41
4.4.1	<i>Cadenas de cráteres</i>	41
4.4.2	<i>Perfiles</i>	43
4.4.3	<i>Fallas y Cuencas</i>	46
4.4.4	<i>Análisis de paleo-deformación</i>	48
5	DISCUSIÓN	58
5.1	ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DE DEFORMACIÓN	58
5.2	MODELOS TECTÓNICOS	63
5.3	MODELOS TECTÓNICOS PROPUESTOS	70
5.3.1	<i>Modelos regionales anteriores</i>	70
5.3.2	<i>Modelos análogos en la Tierra</i>	72
5.3.3	<i>Temporalidad relativa</i>	77

6	CONCLUSIÓN	82
7	BIBLIOGRAFÍA.....	83
8	ANEXOS	86
8.1	ANEXO 1	86

Índice de Figuras

Figura 1:	Mapas geológicos de Marte antes de enviar las primeras sondas con las misiones Mariner al planeta.	2
Figura 2:	Primeros mapas luego de las misiones Mariner.	3
Figura 3:	Extracto del mapa geológico actual de Marte.	4
Figura 4:	Escala de tiempo geológico de Marte según Neukum en Hartmann y Neukum (2001).....	5
Figura 5:	Mapa topográfico de Marte (Tanaka et al., 2014).	6
Figura 6:	Modelos de elevación digital de la Región de Tharsis.	7
Figura 7:	Principales propuestas sobre deformación en el Noctis Labyrinthus y alrededores.....	9
Figura 8:	Diagrama de flujo sobre metodología aplicada en el trabajo.....	14
Figura 9:	Comparación de edades geológicas entre la Tierra y Marte.	22
Figura 10:	Mapa geológico de Noctis Labyrinthus. Basado en Tanaka et al., (2014).	25
Figura 11:	Propuestas estructurales para el Noctis Labyrinthus y la región de Tharsis en general.	27
Figura 12:	Mapa de lineamientos.	30
Figura 13:	Diagramas de rosa de cada clasificación de lineamientos.....	31
Figura 14:	Histogramas de largo de lineamientos.	31
Figura 15:	Mapa de lineamientos y cuencas.....	32
Figura 16:	Conteo de cráteres general de la zona de estudio sin distinción de unidades.....	34
Figura 17:	Mapa con unidades geológicas principales preliminares.	35
Figura 18:	Conteo de cráteres de unidades principales.....	36
Figura 19:	Conteo de cráteres de unidades principales.....	37
Figura 20:	Mapa geológico de la zona.	40
Figura 21:	Cadenas de Cráteres.	42
Figura 22:	Perfiles transversales al Noctis Labyrinthus de oeste a este.	44
Figura 23:	Perfiles en detalle de cuencas a lo largo del Noctis Labyrinthus utilizando el DEM de MOLA...45	45
Figura 24:	Fallas y cuencas.....	47
Figura 25:	Primer dominio estructural.....	49
Figura 26:	Segundo dominio estructural.....	51
Figura 27:	Tercer dominio estructural.	52
Figura 28:	Cuarto dominio estructural.....	54
Figura 29:	Direcciones de tensión y contracción para cada dominio estructural.....	55
Figura 30:	Etapas de las diferentes cinemáticas ocurridas en el Noctis Labyrinthus a lo largo de su evolución.....	57
Figura 31:	Secuencia de características de la zona de Noctis Labyrinthus, Noctis Fossae y Syria Planum..59	59
Figura 32:	Comparación entre las etapas cinemáticas de este estudio sobre la historia tectónica del Noctis Labyrinthus y las etapas de distintos sets de fallas descritos por Tanaka y Davis (1988).....	60
Figura 33:	Mapa de pendientes de la zona de estudio.	61

Figura 34: Posiciones y direcciones de vents en la región de Tharsis.....	62
Figura 35: Modelo tectónico del Noctis Labyrinthus y alrededores según Yin (2012).	63
Figura 36: Comparación de geomorfologías similares del Noctis Labyrinthus (a la izquierda) y los Himalayas (a la derecha).....	64
Figura 37: Comparación de geomorfologías similares entre el Noctis Labyrinthus (a la izquierda) y el Rift de África (a la derecha).	66
Figura 38: Comparación de geomorfologías más específicas entre el Noctis Labyrinthus y el Basin and Range en Estados Unidos.	67
Figura 39: Comparación de geomorfologías más específicas entre el Noctis Labyrinthus y la Puna en el norte de Chile.	68
Figura 40: Diagrama esquemático y estructural de parte de la región de Tharsis.	70
Figura 41: Modelo tectónico de la región de Tharsis según Yin (2012) y extraído del mismo estudio.	71
Figura 42: Placa Arábica vs Plató de Thaumasia.	73
Figura 43: Comparación de modelos tectónicos entre la meseta de Thaumasia y la zona sureste de la placa Euroasiática.	74
Figura 44: Perfiles transversales en la Placa Arábica.....	75
Figura 45: Perfiles transversales en la Meseta de Thaumasia.	76
Figura 46: Recuadro cronológico y estructural de la meseta de Thaumasia.	78
Figura 47: Modelo estructural en 3D de la posible configuración tectónica de la meseta de Thaumasia.	80

Índice de Tablas

Tabla 1: Comparación de edades de cada unidad.	38
Tabla 2: Tabla comparativa de posibles modelos tectónicos similares al Noctis Labyrinthus.	69

1 Introducción

1.1 Antecedentes generales

El planeta Marte ha sido objeto de estudio desde hace cientos de años e incluso miles de años, pasando desde los estudios astronómicos de los antiguos egipcios e incluso babilónicos (Sheehan, 1996), hasta los estudios más recientes de hoy en día, donde cada vez se puede obtener más detalle del planeta rojo. Dentro de los datos esenciales del planeta, destacan que es el cuarto planeta del sistema solar y el más externo de los planetas denominados rocosos o terrestres que conforman el sistema solar interior (Coles et al., 2019). También es el segundo más pequeño luego de Mercurio, con un diámetro de 6794.4 km, además de poseer una gravedad equivalente a solo el 37,6% de la Tierra y una atmósfera compuesta mayormente por un 95% de dióxido de carbono (Coles et al., 2019).

Con el tiempo, y a medida que la tecnología pudo avanzar, también se ha logrado generar mapas de Marte. Si bien los primeros mapas geológicos de Marte (Figura 1) se remontan hacia 1841 con la propuesta de Johann Mädler y Wilhelm Beer (Beer y Mädler, 1841), estos han sufrido severas modificaciones. Posteriormente, las siguientes aproximaciones a la cartografía del planeta rojo vinieron de la mano de Richard Proctor en 1870 (Proctor, 1870), Camille Flammarion en 1884 (Flammarion, 1884) y Giovanni Schiaparelli en 1886 (Schiaparelli, 1886), siendo las aproximaciones del segundo las que perdurarían en el tiempo y serían actualizadas por Percival Lowell en 1895 (Lowell, 1895) y, finalmente, por el Conde Carl Slipher en 1962 (Aeronautical Chart And Information Center, 1962), quien publicaría el mapa que usaría la Fuerza Aérea de Estados Unidos para el programa Mariner entre 1962 y 1973. Cabe mencionar que todos estos mapas fueron realizados desde la Tierra por medio de telescopios y previo a la exploración espacial.

El programa Mariner en sí consideraba 10 misiones distintas, cada una considerando una nave espacial, o sonda con propósitos (medición de temperatura, obtención de imágenes, obtención de datos de gravedad, etc) y destinos distintos (Mercurio, Venus y Marte). Nombradas Mariner 1 hasta Mariner 10, la mayoría de las sondas (3, 4, 6, 7, 8 y 9) estaban destinadas a Marte aunque solo

lograron cumplir su objetivo la 4, 6, 7 y 9. Dentro de estas últimas, las primeras tres tenían por objetivo acercarse a Marte para obtener datos y luego volver a la Tierra, mientras que la última, la Mariner 9, sería la primera y única de todas las sondas del programa que estaba pensada para, por primera vez en la historia de la humanidad, orbitar otro planeta, en este caso, Marte.

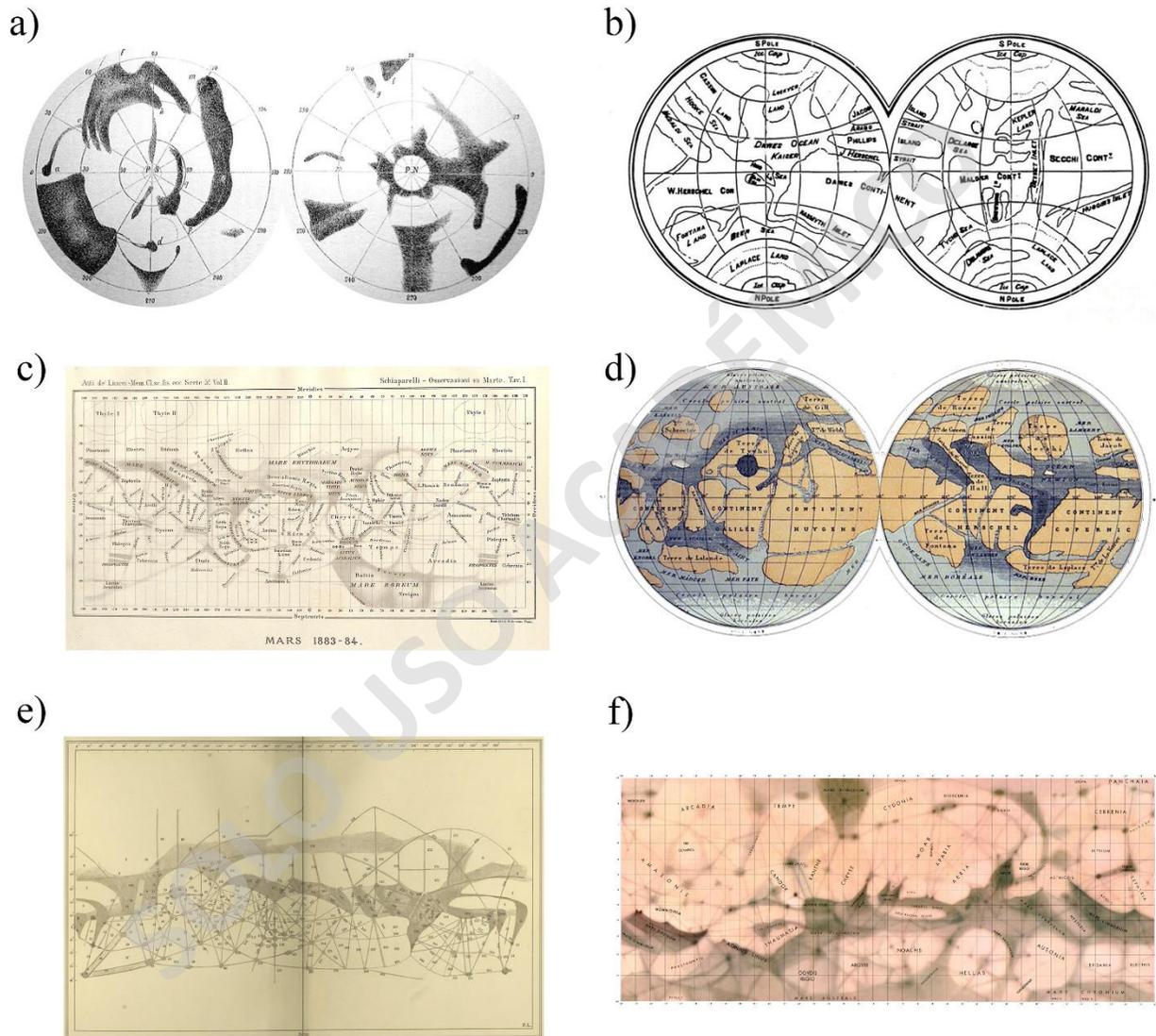


Figura 1: Mapas geológicos de Marte antes de enviar las primeras sondas con las misiones Mariner al planeta. Estos corresponden a los siguientes autores: a) Mädler y Wilhelm Beer (1840); b) Richard Proctor (1870); c) Camille Flammarion (1884); d) Giovanni Schiaparelli (1886); e) Percival Lowell (1895); f) Conde Carl Slipher (1962).

Fue recién en 1971 que se pudo obtener una vista completa, detallada y más cercana de Marte (Figura 2a), dando cabida entonces al primer mapa geológico moderno del planeta en 1978 (Figura

2b), de la mano de la USGS, el cual ha sido actualizado constantemente, gracias a misiones como el proyecto Viking que han aportado en imágenes satelitales y de superficie, hasta su última versión en el 2014 (Tanaka et al., 2014) (Figura 3), la cual se sustenta en los datos del MGS (Mars Global Surveyor), el DEM de MOLA y el mosaico de imágenes THEMIS (Thermal Emission Imaging System) daytime infrared (IR) del ODY (Mars Odyssey) (Tanaka et al., 2014).

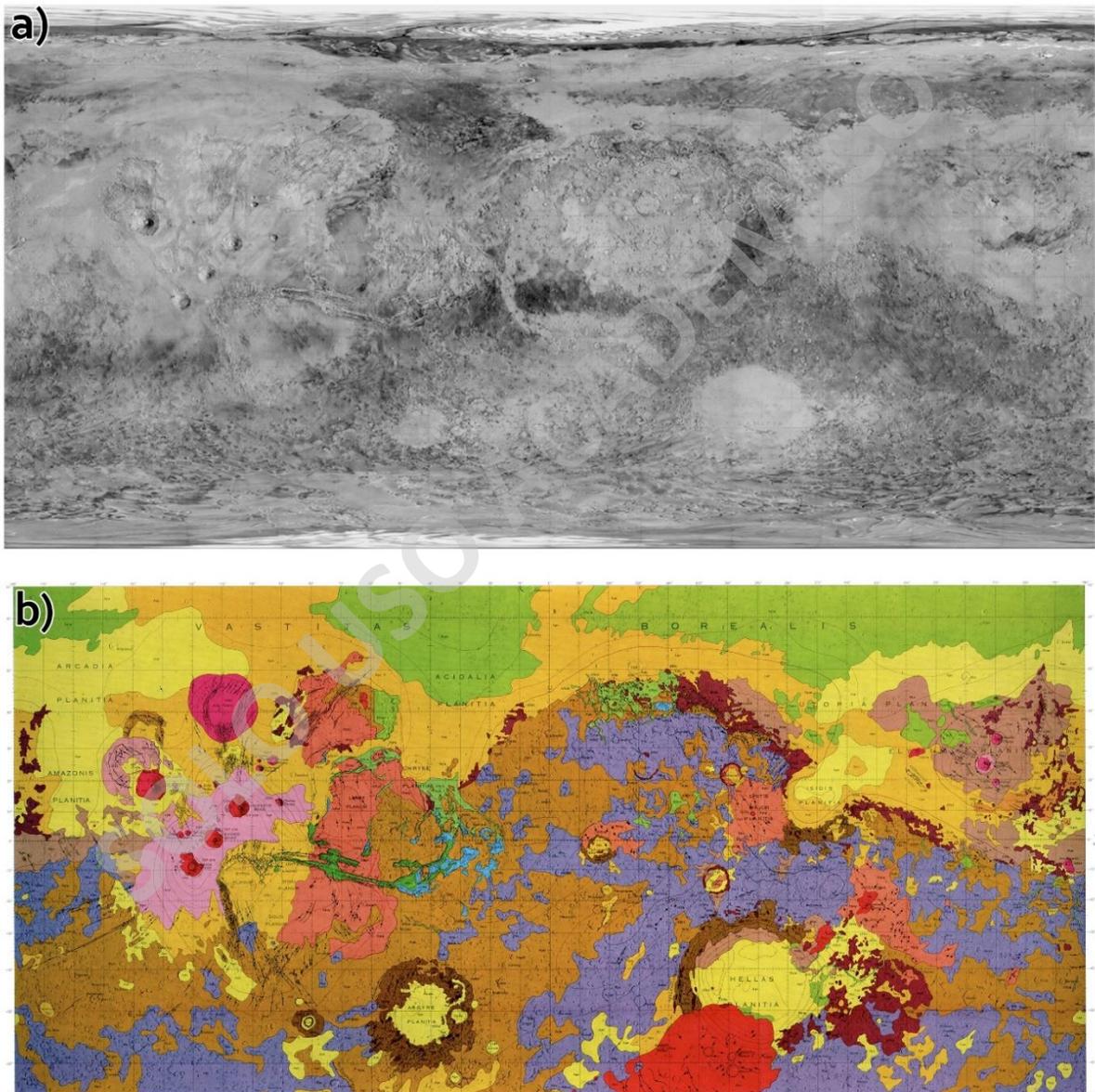


Figura 2: Primeros mapas luego de las misiones Mariner. A): Mapa global generado gracias al mosaico de imágenes de la sonda Mariner 9. B): Primer mapa geológico de Marte en detalle generado a partir de las imágenes de la sonda Mariner 9, con autoría de Scott y Carr (1978) para el USGS.

Adicional a la mejor resolución de imágenes, también se han ido generando nuevas técnicas y nueva información para poder hacer más precisos estos mapas geológicos. Por ejemplo, dentro de técnicas medianamente nuevas, está el conteo de cráteres (Neukum y Hiller, 1981; Hartmann y Neukum, 2001; Ivanov, 2001), explicado en detalle en las secciones de metodología y marco teórico más adelante, pero que en resumidas cuentas, se utiliza para obtener edades relativas en planetas (excluyendo a la Tierra) u otros astros como la Luna a través del conteo de cráteres en cierta área determinada.

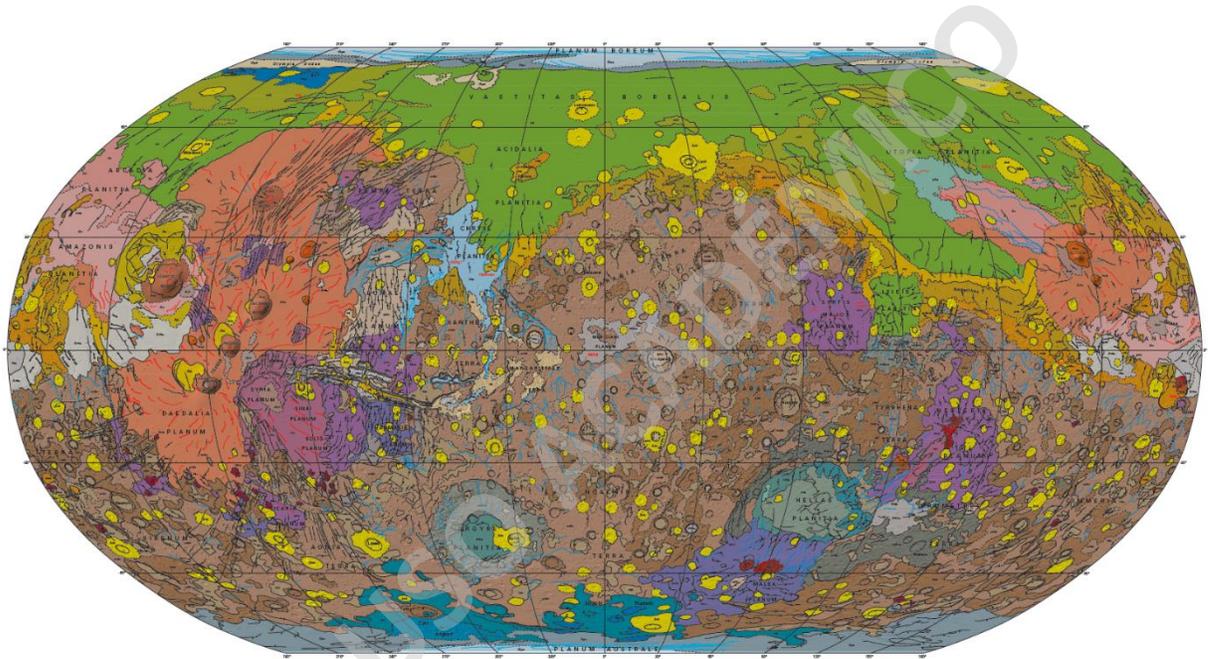


Figura 3: Extracto del mapa geológico actual de Marte. Publicado por el USGS con autoría de Tanaka et al. (2014).

Por supuesto, tener edades relativas también conllevó a la consecuencia de tener que crear una escala de tiempo marciana, siendo la más aceptada la generada por Hartmann y Neukum (2001) (Figura 4). En ella, se consideran tres unidades cronológicas principales: el Noéico (4.15 – 3.71 Ga), el Hespérico (3.71 – 3.37 Ga) y el Amazónico (3.37 – 0 Ga), con sus respectivas subdivisiones y basadas en las definiciones de Tanaka (1986).

Aunque cada vez se ha obtenido más detalle de la geología de Marte, logrando realizar mapas a escala 1:70.000.000 (Tanaka et al., 2014), aún se desconoce mucho dada la escasez de estudios in-situ. Aún se teoriza sobre la formación de los rasgos desarrollados en superficie de muchas zonas,

si hubo o no agua, o incluso vida (Tosca et al., 2008). Aún no se tiene certeza de cómo es que ha funcionado la dinámica interna del planeta hasta hoy en día, pues pareciera haber tenido una dinámica distinta a la que se observa hoy en día, en especial cuando se habla de temas como el vulcanismo o tectonismo. Si bien por mucho tiempo se ha creído que no es tectónicamente activo, estudios recientes han demostrado cierta sismicidad producida al nivel de manto superior, en la zona de Cerberus Fossae, sugiriendo que es una zona sísmica activa y que el manto marciano es móvil (Sun, 2022).

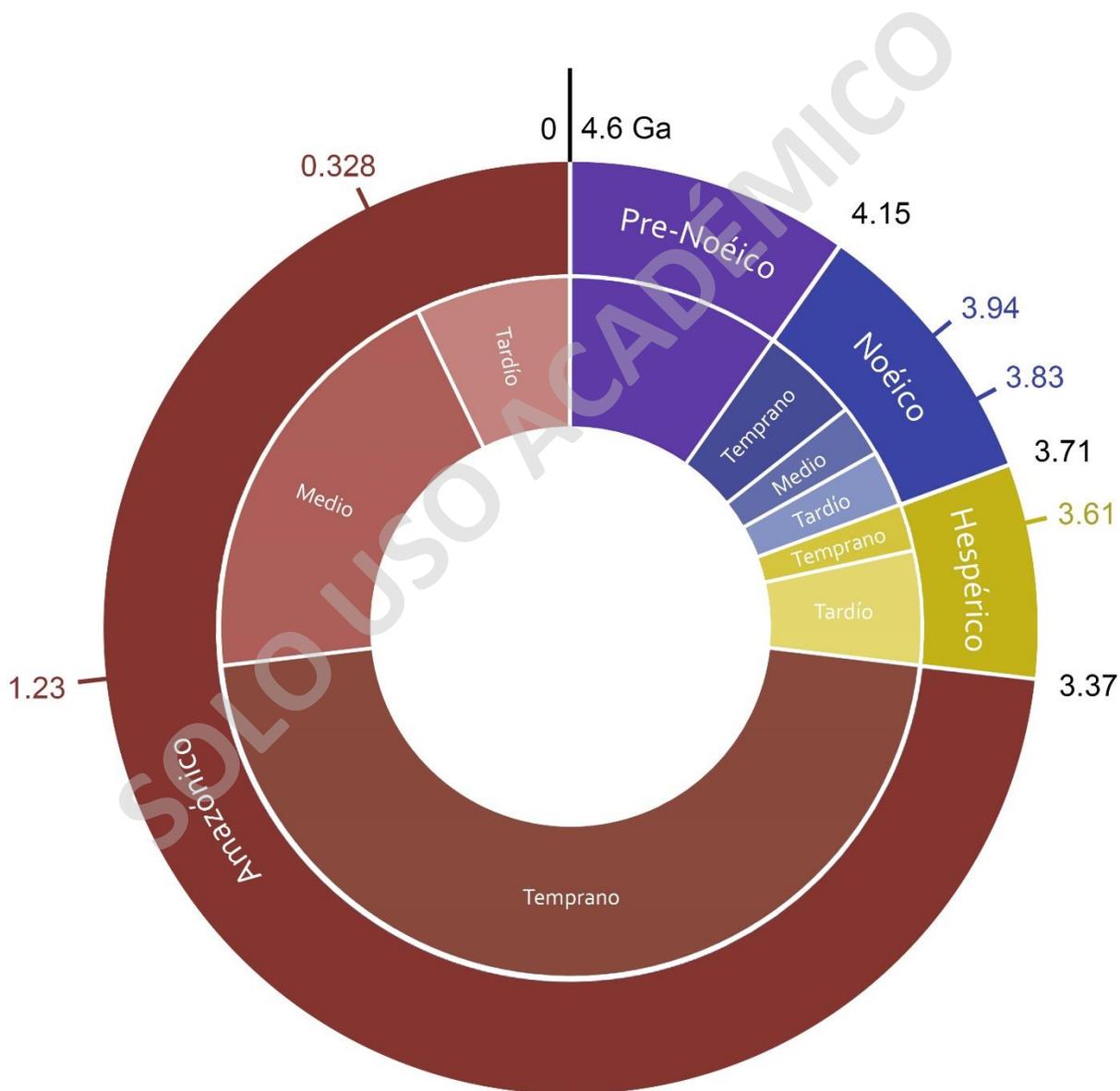


Figura 4: Escala de tiempo geológico de Marte según Neukum en Hartmann y Neukum (2001). Modificado de la ilustración de Donald C. Barker en Coles et al. (2019).

El planeta Marte presenta tres principales provincias fisiográficas distintivas. En primer lugar, se tienen las llanuras del norte, que es una planicie de baja altura concentrada en casi todo el hemisferio norte del planeta. En segundo lugar, se tienen las tierras altas del sur, que es una elevación del relieve con respecto a las llanuras del norte (de hasta ~7 km sin considerar la región de Tharsis considerando el DEM de MOLA), y que abarca todo el hemisferio sur y parte del norte (Figura 5).

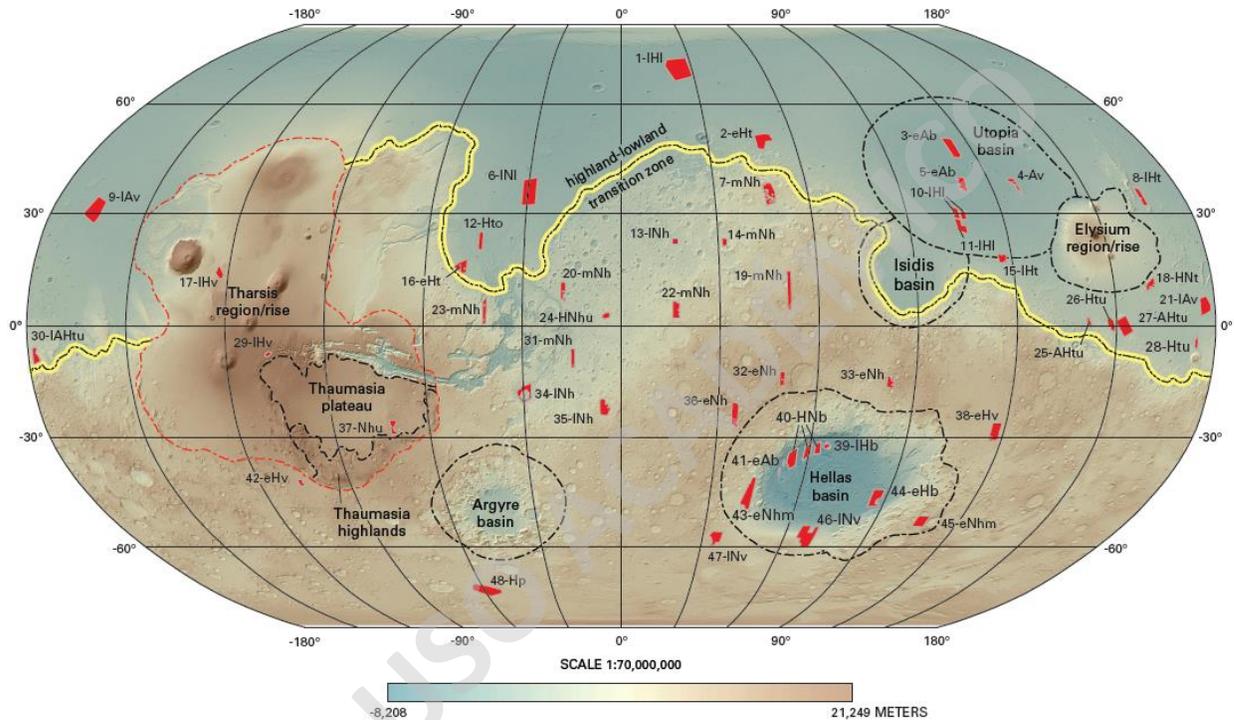


Figura 5: Mapa topográfico de Marte (Tanaka et al., 2014). Polígonos rojos indican zonas en donde se hizo conteo de cráteres; línea amarilla indica separación entre las llanuras del norte y las tierras altas del sur; línea punteada roja indica los límites de la región de Tharsis; líneas punteadas negras indican características geográficas destacables en Marte, como mesetas, regiones o cuencas.

También está la región de Tharsis, que es la zona más elevada de Marte, característica que puede ser atribuida a la presencia de volcanes como el Monte Olimpo y los Montes de Tharsis, que son volcanes de escudo de alturas superiores a los 14 km sobre el geoide de referencia de Marte, con el primero de estos mencionado superando los 20 km.

La misma elevación de la región de Tharsis provocada por los volcanes ha producido un engrosamiento de la corteza, teniendo como consecuencia que haya distintos esfuerzos en la litósfera, los cuales serían la razón principal por la que habría deformación tectónica en la zona

(Bouley et al., 2018). Esta deformación tectónica sería observada y representada a través de fallas radiales o concéntricas hacia el centro de Tharsis y se remontaría incluso a edades como el Noéico Temprano (4.15 – 3.94 Ga) (Bouley et al., 2018).

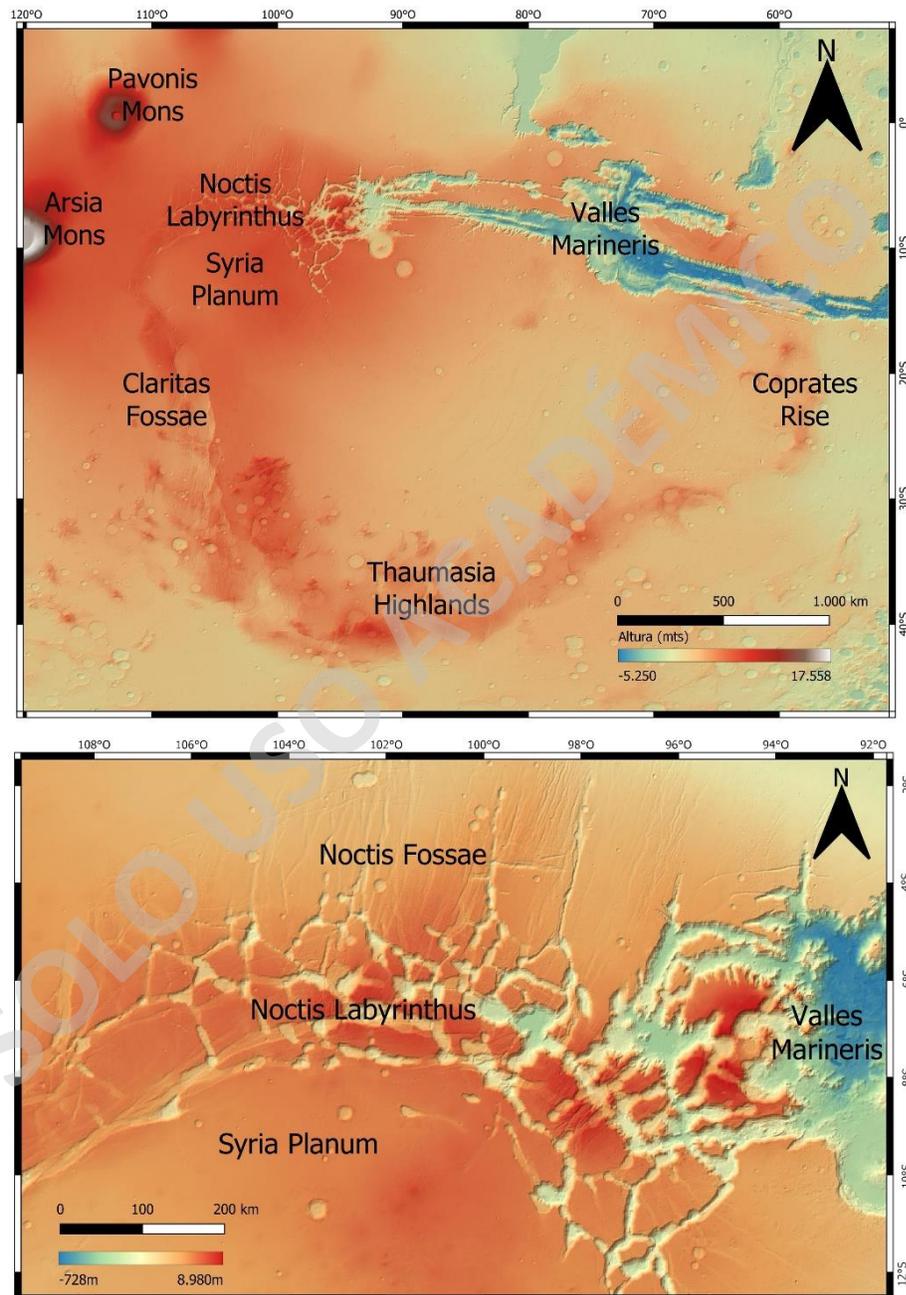


Figura 6: Modelos de elevación digital de la Región de Tharsis. Arriba: Zona Thaumasia, mostrando estructuras principales como el Valles Marineris, Noctis Labyrinthus, Claritas Fossae, Thaumasia Highlands, Coprates Rise, etc. Abajo: Acercamiento al Noctis Labyrinthus, específicamente a la zona de estudio.

Es en esta misma región que se encuentra el Noctis Labyrinthus (Figura 6), en conjunto con otras estructuras importantes como Valles Marineris y parte de la meseta de Thaumasia, donde se incluyen a Claritas Fossae, Thaumasia Highlands y Coprates Rise.

La zona de Noctis Labyrinthus ha sido, en general, poco estudiada de manera específica y suele ser mencionada en otros estudios más regionales. La gran mayoría de los estudios estructurales en la región están concentrados en el Valles Marineris, usualmente descrito como un sistema tipo cañón (Masson, 1980; Peulvast y Masson, 1993; Singh et al., 2021), con una gran influencia de fallas normales a lo largo de toda la estructura (Schultz, 1991) y, a veces, como una zona transtensional sinistral (Yin, 2012) o como falla de rumbo dextral (Courtilot, 1975). Mientras, aquellos estudios que mencionan a Noctis Labyrinthus y realizan estudios en este, van de la mano también con estudios de Valles Marineris (Bistacchi et al., 2003; Masson, 1977) o mucho más regionales (Bouley et al., 2018; Carr, 1974; Courtilot, 1975; Plescia y Saunders, 1982; Tanaka y Davis, 1988; Tanaka et al., 1991; Yin, 2012).

Cabe decir que, si bien no hay estudios exclusivamente del Noctis Labyrinthus desde un punto de vista estructural, Leone (2014) se ha enfocado en el vulcanismo de la zona. También debe destacarse el estudio de Tanaka y Davis (1988) pues, si bien engloba al Noctis Labyrinthus junto con Syria Planum y Claritas Fossae, es de los estudios más completos que se han hecho desde el punto de vista estructural y cronológico de la zona de estudio.

Al caracterizar las estructuras regionales y las direcciones de deformación, el Noctis Labyrinthus representa un problema aun sin resolver, ya que está situado entre Valles Marineris y los Montes de Tharsis, que son morfologías a partir de las cuales se infiere direcciones de deformación tectónico incompatibles cinemáticamente entre sí y que podrían estar influenciando a nivel más regional y no solo al Noctis Labyrinthus. Si bien hay estudios en donde se le da una explicación de índole tectónico a esto (Yin, 2012), al menos en lo que respecta al Noctis Labyrinthus, el estudio anterior junto con el de Bistacchi et al. (2003) y estudios más generales como el de Courtilot (1975), plantean dos posibles direcciones principales de deformación para el Noctis Labyrinthus: en dirección NNE/SSW (Bistacchi et al., 2003) y en dirección NNW/SSE (Yin, 2012), siendo

mecánicamente incompatibles el uno del otro y ambos usando argumentos distintos. En paralelo, Courtillot (1975) propone una deformación extensiva casi W-E al norte del Noctis Labyrinthus (Figura 7).

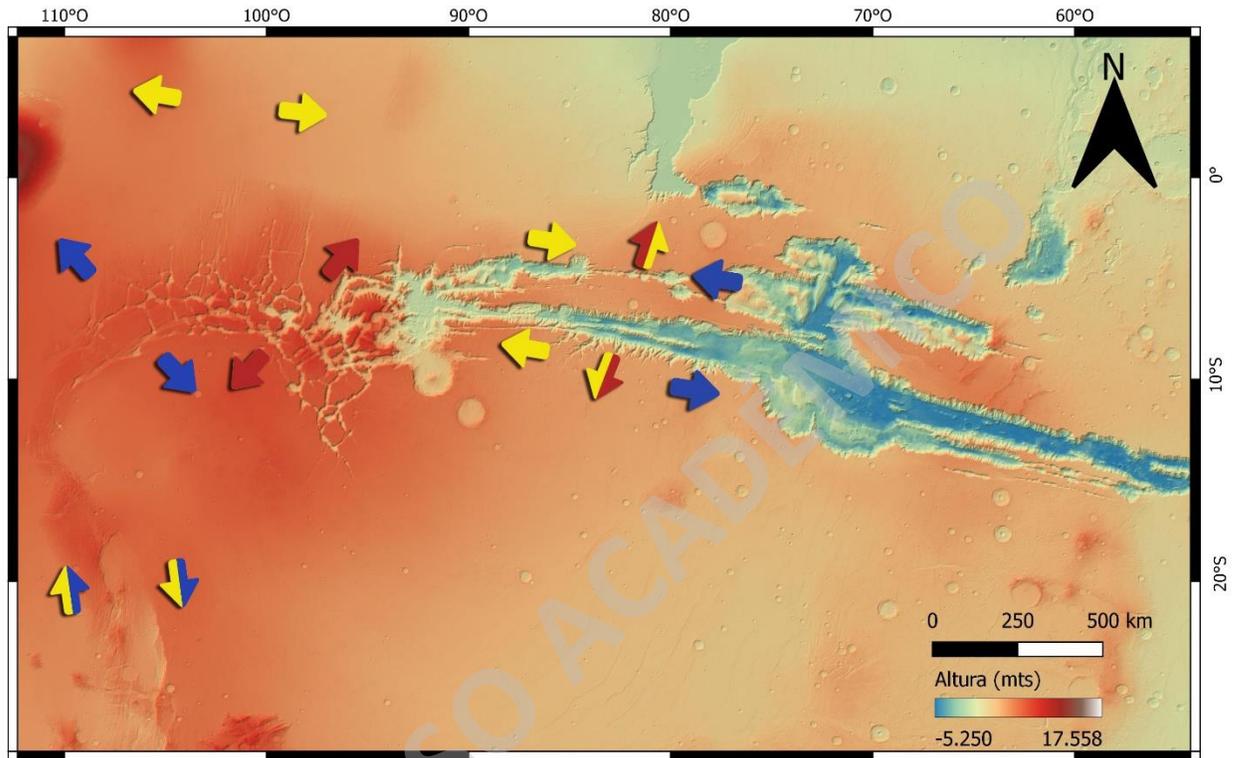


Figura 7: Principales propuestas sobre deformación en el Noctis Labyrinthus y alrededores. Cada color corresponde a una referencia distinta: Rojo: deformación según Bistacchi et al., (2003); azul: deformación según Yin, (2012) y amarillo: cinemáticas según Courtillot, (1975).

Por el lado de las diferencias a nivel temporal, sucede que los estudios estructurales específicos de Noctis Labyrinthus (Bistacchi et al., 2003; Masson, 1977; Tanaka y Davis, 1988) son más antiguos que las actualizaciones que se han hecho al mapa geológico de Marte (Tanaka et al., 2014). Esto ocasiona un problema importante, pues desde aquellos estudios estructurales, se ha determinado que el Noctis Labyrinthus no pertenece al Noéico, sino que al Hespérico Tardío (Bouley et al., 2018; Tanaka et al., 2014), lo que cambia la temporalidad de las relaciones estructurales que tiene, por ejemplo, con el Valles Marineris, perteneciente al Hespérico Temprano por su mayor actividad durante este periodo (Tanaka y Davis, 1988; Tanaka et al., 2014). Esto incluso podría llevar a una cadena de acontecimientos que pudieron ocurrir en diferentes periodos de Marte, todo dependiendo de los estudios realizados y las nuevas tecnologías.

En base a los antecedentes expuestos, la problemática que existe en el Noctis Labyrinthus y la meseta de Thaumasia, corresponde a la falta de integración de datos actualizados y la falta de estudios más específicos en ambas áreas, lo que motiva a la realización de este estudio

1.2 Hipótesis

El Noctis Labyrinthus es una provincia geomorfológica de la región de Tharsis de Marte, que ha sido controlada por diversos eventos tectónicos, en directa correlación con la formación del Valles Marineris y la meseta de Thaumasia.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos generales

Entender los procesos tectónicos que ayudaron a formar el Noctis Labyrinthus y su relación con geomorfologías adyacentes como el Valles Marineris y la meseta de Thaumasia.

1.3.2 Objetivos específicos

- Generar un mapa más detallado de la zona en cuanto a temporalidad.
- Reconocer direcciones de movimiento que puedan ayudar a identificar los tipos de estructuras que formaron al Noctis Labyrinthus.
- Establecer un orden temporal de estos controles tectónicos.
- Considerar implicancias de los controles tectónicos hacia y desde las estructuras cercanas al Noctis Labyrinthus, como el Valles Marineris, los Montes de Tharsis, Claritas Fossae y la meseta de Thaumasia en general.
- Establecer similitudes y diferencias con análogos terrestres.
- Generar un modelo tectónico claro del Noctis Labyrinthus y de la región.

1.4 Ubicación

El área de estudio se encuentra en la región de Tharsis del planeta Marte, entre los 1° 26' S y los 12° 32' S y entre los 91° 41' W y los 109° 30' W. Por el Este limita con el Valles Marineris, por el Norte y Oeste con los Montes de Tharsis y al Sur con el Syria Planum (Figura 6).

1.5 Metodología

1.5.1 Mapeo geológico

A través del DEM de MOLA, se comenzó a reconocer y marcar lineamientos y morfologías de la zona. Al no contar con la suficiente resolución en el DEM (200mts/píxel), se utilizó el apoyo de imágenes CTX, que tienen mayor resolución (5mts/píxel). Además, también se cuenta con las imágenes THEMIS Day IR, de menor resolución (100mts/píxel). Estas son extraídas de la aplicación *JMARS* (Christensen et al., 2009), la cual contiene estos mosaicos de imágenes de distintas resoluciones a modo de mapa navegable.

Utilizando estos sets de imágenes, se trazaron lineamientos considerando que son rasgos lineales o levemente curvos de una longitud suficientemente grande como para ser visible en el DEM y en imágenes THEMIS Day IR (de al menos 1km de largo). Adicionalmente, los mismos lineamientos se clasificaron en tres grupos distintos (grupos 1, 2 y 3) al tiempo en que se fueron marcando de acuerdo con criterios de cinemática y relaciones de corte.

Por el lado de las morfologías, se tuvieron en consideración cuencas, cuencas en echelón, cuencas transtensionales y graben. Todos clasificados con los mismos criterios aplicados a los lineamientos. Adicionalmente, se reconocieron morfologías particulares como las cadenas de cráteres, que se clasificarían aparte de las morfologías anteriores, al no ser consideradas totalmente de origen netamente estructural.

1.5.2 Extracción de datos

A partir del mapeo geológico, se utilizaron los datos del mapeo de lineamientos (largo y orientación) para crear histogramas que denotaran cantidad de lineamientos por rango de longitud. A su vez, también se realizaron diagramas de rosa. Tanto histogramas como diagramas de rosa se hicieron para cada uno de los grupos de lineamientos (grupos 1, 2 y 3).

1.5.3 Selección de unidades principales

Se realizó una selección de las principales zonas u unidades que puedan distinguirse entre sí, ya sea por morfología como por distintos rasgos geológicos, estos últimos definidos de acuerdo con criterios como la inercia termal, cambios de colores, relaciones de corte y texturas geomorfológicas. Cuando fue necesario, se volvió a utilizar el apoyo de imágenes CTX y THEMIS de *JMARS* para contar con mayor detalle de estas zonas.

Al seleccionar estas unidades, se generó un nuevo mapa geológico de la zona, además de lograr darle cierta temporalidad teniendo en cuenta tanto la metodología del conteo de cráteres como las edades ya establecidas por Tanaka et al., (2014).

1.5.4 Conteo de cráteres

A partir de las imágenes CTX y THEMIS de *JMARS* se hizo un conteo de cráteres por cada unidad geológica caracterizada con tal de obtener una temporalidad relativa entre las distintas unidades. Este método se basa en contar cráteres dentro de cierto rango de diámetros en un área específica (en km²), con tal de obtener la edad aproximada de esta (Neukum y Hiller, 1981; Hartmann y Neukum, 2001; Ivanov, 2001).

En este caso, se tuvieron en consideración cráteres de 3 km en adelante. Todo lo anterior se consigue marcando los cráteres en *JMARS* y procesando la información y generando los gráficos a través del programa *CraterStats* (Michael et al., 2010), con la presentación de Hartmann (iteración del 2002, sin publicar).

1.5.5 Dominios estructurales

A partir del DEM de MOLA e imágenes tanto THEMIS como CTX de *JMARS*, se realizó una selección de zonas afectadas de manera estructural y que pudieran ayudar a establecer una temporalidad de movimientos. Con esto, se buscaron morfologías específicas de origen estructural que pudiesen denotar esta temporalidad de movimientos, como lo pueden ser fallas, grabenes o cuencas.

Luego, a partir del mapeo de lineamientos y unidades geológicas en las zonas seleccionadas, utilizando criterios de desplazamiento, se infieren direcciones de deformación, con las cuales es posible separar espacial y temporalmente distintos dominios estructurales.

1.5.6 Análisis geomorfológico y topográfico en base a perfiles de elevación

Utilizando el DEM de MOLA, se generaron perfiles en *QGIS 3.18* (QGIS Development Team, 2020), de los principales dominios estructurales, de cuencas a lo largo del Noctis Labyrinthus, del Noctis Labyrinthus en general y de la región de Thaumasia en general.

Los perfiles de los principales dominios estructurales se realizaron con la intención de comparar variaciones tanto horizontales como verticales y observar la existencia de morfologías importantes (como cuencas o graben).

El análisis topográfico de las cuencas a lo largo del Noctis Labyrinthus se llevó a cabo para ver la variación de profundidad de estas a lo largo de la zona de estudio y para observar variaciones entre los ángulos de sus pendientes.

Los análisis geomorfológicos y topográficos tanto del Noctis Labyrinthus como de la región de Thaumasia se realizaron con tal observar las principales morfologías de cada zona y poder compararlas con posibles homólogos en la Tierra, también utilizando DEMs, proveídos por el

USGS (United States Geological Survey) y por GEBCO (Global Bathymetric Chart of the Oceans).

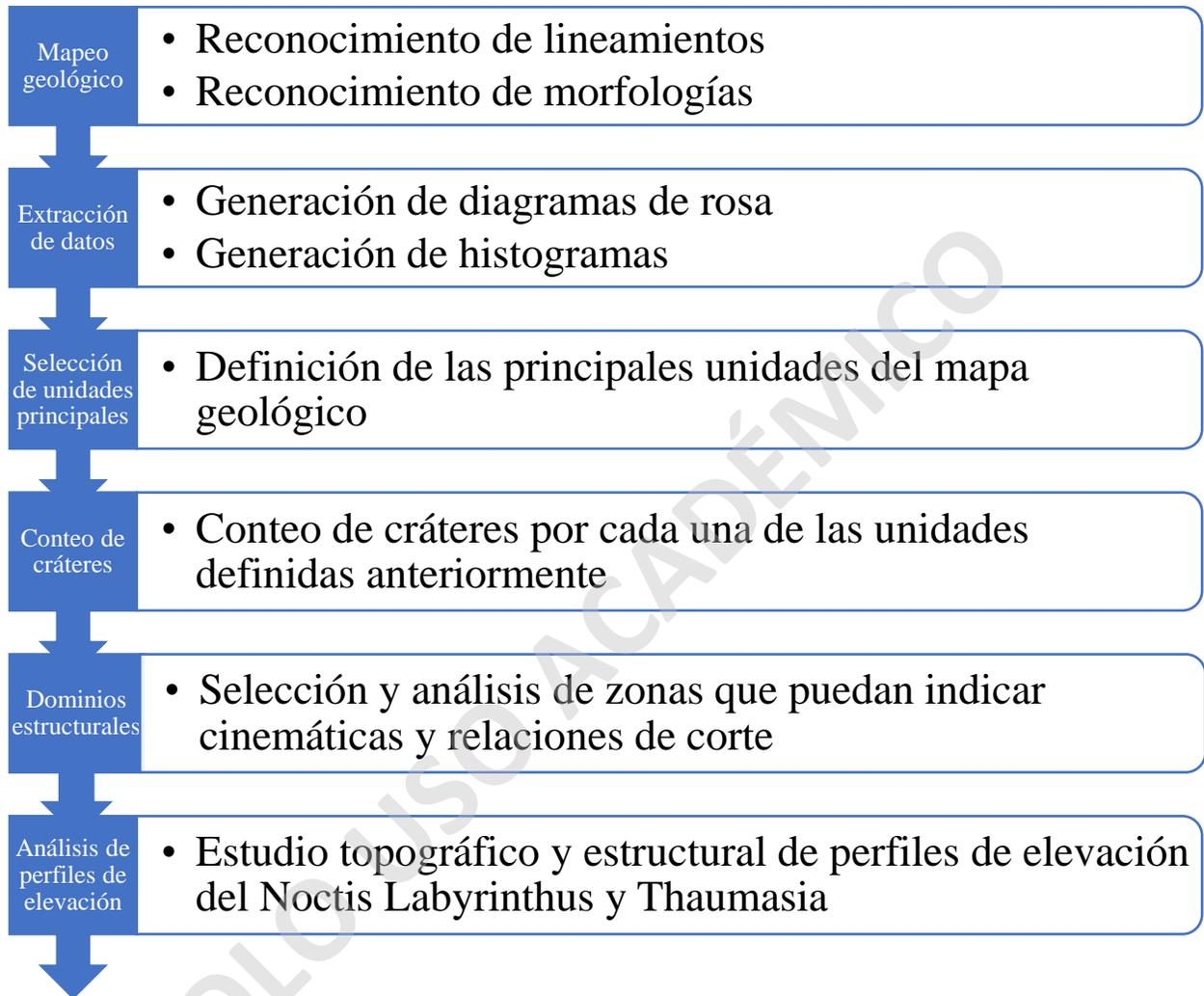


Figura 8: Diagrama de flujo sobre metodología aplicada en el trabajo.

2 Metodología

2.1 Conteo de cráteres

Durante los últimos 50 años, la mejor y única manera de estudiar la cronología de los procesos geológicos, en planetas terrestres, a distancia es a través del conteo de cráteres en sus superficies (Fassett, 2016). Si bien las misiones Apollo y Luna han contribuido enormemente a la calibración de datos para generar una cronología absoluta de cráteres gracias a las muestras traídas desde la Luna, no ocurre lo mismo con planetas como Mercurio, Venus o Marte. Es por ello por lo que, se han probado otros métodos para suplir esta falta de datos para estos planetas, como por ejemplo, extrapolar el modelo de conteo de cráteres de la Luna a los demás planetas, teniendo en cuenta el flujo de impactos para cada zona orbital. Esto, naturalmente, hace que la precisión sea menor al momento de estudiar la cronología de eventos geológicos en otros planetas, sin embargo, no deja de ser la mejor herramienta a la hora de estimar una cronología a distancia.

Es importante mencionar que los cráteres de impacto son morfologías comunes en las superficies y cortezas planetarias, y estos son, en su mayoría, producidos por asteroides o escombros de asteroides en lo que respecta a los planetas interiores del sistema solar. Estos tienen la característica general de que, a mayor población de cráteres en una superficie, esta será más antigua, ya que si no sufrió ninguna modificación, ha podido acumular mayor número de cráteres a lo largo del tiempo (Fassett, 2016).

Para medir la población de cráteres en una superficie se deben realizar 4 etapas: (1) Definir un área en donde se haga el conteo. Esta área debe tener cierta lógica a la hora de ser definida, pues hay que evitar que otras unidades geológicas interfieran en el conteo. Por ejemplo, una lava sobre nuestra área de conteo alteraría los datos, por lo que habría que excluirla a la hora de hacer el procedimiento. (2) Mapear minuciosamente los cráteres superpuestos en el área (o al menos clasificar aquellos que están superpuestos), (3) medir el tamaño del área de conteo y el diámetro de cada uno de los cráteres, y (4) medir correctamente la población total de cráteres que, por lo

general, se toma un tamaño mínimo como referencia (Fassett, 2016) (en este trabajo en particular, a partir de 3km).

El conteo de cráteres ha sido ya utilizado en Marte durante años (Condit, 1978; Scott y Carr, 1978; Neukum y Hiller, 1981; Tanaka, 1986; Hartmann y Neukum, 2001), dando como resultado trabajos destacables como el mapeo global del planeta (Tanaka et al., 2014) y mapeo de zonas específicas como Thaumasia (Dohm et al., 2001). Incluso otros astros han sido mapeados con sus respectivas edades como la luna (Fortezzo et al., 2020) o cuadrantes de Mercurio (Trask y Dzurisin, 1984).

Una de las características más destacables que se ha logrado observar con los conteos de cráteres es el reconocimiento de algunas unidades volcánicas en Marte que tienen claramente baja densidad de cráteres en comparación al resto de otras áreas. Estos datos indicaron que el volcanismo en Marte es relativamente joven, de entre 1.000 a menos de 100 Ma, lo que implicaría que provincias volcánicas como Tharsis y Elysium se mantuvieron activas por miles de millones de años (aproximadamente desde el Noéico medio al Amazónico tardío) (Fassett, 2016).

Si bien toda la teoría de que, a mayor cantidad de cráteres, más antigua es el área de estudio (a grandes rasgos), hay un mecanismo que puede afectar la población de cráteres con el paso del tiempo, y este es que los mismos impactos de nuevos asteroides generan cráteres que “borran” los cráteres más antiguos. Como resultado, se tiene que hay una densidad máxima de cráteres de cierto tamaño, y a esta densidad se alcanza una condición de equilibrio, llamada “equilibrio de saturación” o “saturación”. Si este equilibrio de saturación es alcanzado, ya no es posible separar las edades relativas de áreas basadas en su densidad de cráteres, por lo que el valor de las estadísticas de cráteres para la determinación de edad es limitado (Fasset, 2016).

Para el presente trabajo, además de definir la utilización solo de cráteres de más de 3 km, también se tuvo en cuenta el conteo por unidad, las que se diferencian de las definidas por Tanaka et al, 2014 descritas anteriormente en el apartado de Marco Geológico. Sumado a esto, se utilizan las épocas definidas por Michael (2013), que son basadas en Hartmann y Neukum (2001) pero modificadas teniendo en consideración la constante modificación de la superficie. También se hace

uso de la función de producción de Ivanov (2001), la cual consiste en el conteo de cráteres de cierto tamaño que han sido formados en relación con otros de otros tamaños. Por último, se utiliza la función de cronología de Hartmann y Neukum (2001), la cual define la densidad de cráteres de cierto diámetro para determinar los límites de cada época marciana.

2.2 Mapeo estructural

El mapeo estructural es un acercamiento esencial para documentar el deformación tectónico de superficies planetarias tanto en tiempo como en espacio. El mapeo geológico de estructuras tectónicas es valioso para esta documentación, y lleva a posibles resultados como: (1) los tipos de fuente de esfuerzos relacionados a su formación, (2) las propiedades mecánicas de los materiales en donde se formaron y (3) la evolución de la superficie del cuerpo e interior donde relaciones temporales pueden ser determinadas (Tanaka et al., 2010).

La fotointerpretación es quizás uno de los métodos más tradicionales a la hora de estudiar zonas a gran escala, en especial si son de difícil acceso. Cuando se pretende realizar un estudio de otro planeta al que hoy en día no se puede acceder presencialmente, como lo es Marte, más aún si se trata de analizar su geomorfología o incluso llegar a interpretar su tectonismo a una escala regional.

Por supuesto, esta técnica no es perfecta y se puede ver altamente influenciada tanto por la subjetividad del autor como por la resolución de las imágenes. Incluso problemas con el mosaico de imágenes y las condiciones de iluminación son parte de estos posibles problemas (Tanaka et al., 2010).

La fotointerpretación es esencial para la interpretación tectónica en planetas como Marte, y el mapeo de lineamientos es la técnica específica que provee las bases para este tipo de interpretación con la que se ha terminado generando mapas geológicos y geomorfológicos. Para esto, se utilizan generalmente mapas de mosaicos y los lineamientos son digitalizados manualmente y clasificados por el mismo usuario (Vaz et al., 2012), aunque hoy en día se utilizan Sistemas de Información

Geográfica (SIG, o GIS en inglés) como apoyo o incluso para hacer el proceso de manera semi o totalmente automatizada.

Para este trabajo se utilizaron tanto el DEM de MOLA como imágenes CTX y THEMIS para realizar la fotointerpretación de lineamientos, similar a la técnica utilizada por Bistacchi et al. (2003), marcando lineamientos que podrían indicar información sobre cinemáticas e incluso cierta cronología relativa a través de las relaciones de corte. Como agregado, se clasificaron los lineamientos en tres grupos, o colores: Grupo 1: verdes, se utiliza principalmente para la estructura principal del Noctis Labyrinthus, conformada por grandes cuencas de gran profundidad (de hasta 4 km de profundidad al depocentro) y conectadas entre sí. Esta estructura se toma como la más reciente al tener en consideración las relaciones de corte; Grupo 2: amarillos, que muestran características apreciables pero no tan marcadas o evidentes respecto a desplazamientos y/o relaciones de corte; y Grupo 3: rojos, muestran claros desplazamientos con direcciones evidentes y que además cortan otras estructuras, dando así una cronología general clara.

También siguiendo la línea de Bistacchi et al. (2003), se realizaron diagramas de rosa a partir de los lineamientos y por cada set de datos (los tres grupos de lineamientos) para ahondar en el estudio de la paleo deformación de la zona. Sumado a esto, también se generan histogramas de las extensiones generales de los lineamientos por cada una de las clasificaciones.

Finalmente, también se utilizó la técnica de fotointerpretación para analizar estructuras o morfologías relevantes tales como cuencas, definidas como depresiones en la superficie formadas por procesos geológicos tales como tectónica de placas, subsidencia u erosión. Se descartan cuencas creadas por cadenas de cráteres y por impacto de meteoritos.

También se consideran como posibles morfologías a analizar: (1) cuencas pull-apart: formadas en zonas de falla transformantes, donde la tensión generada fractura la roca y produce depresiones, o cuencas de forma alargada, en forma de sigma; (2) cuencas en echelón: similares a las pull-apart en cuanto a morfología y formación, con la particularidad de que ocurre en segmentos escalonados; (3) graben: depresiones alargadas en la corteza formada generalmente por dos fallas normales

paralelas que se desplazan en direcciones opuestas; (4) fallas de rumbo, desarrolladas en planos horizontales, en donde dos bloques van en direcciones opuestas en el plano horizontal.

2.3 Análisis topográfico y geomorfológico

Gracias a la baja tasa de erosión y degradación en el planeta, la deformación asociado a este tectonismo y evidenciado en las estructuras superficiales, se han preservado por miles de millones de años (Klimczak et al., 2018).

Si bien estas estructuras vistas en superficie no son determinantes para entender los procesos involucrados, algunos aspectos de la geometría de fallas se pueden inferir (Klimczak et al., 2018). Por ello es por lo que se tiene en cuenta la caracterización y análisis de perfiles topográficos. Algunos marcadores, como los saltos de superficies, cráteres desplazados, etc., son considerados al momento de cuantificar numéricamente posibles desplazamientos asociados al movimiento de estas estructuras.

Particularmente en este estudio se propuso un estudio de perfiles topográficos basados en el DEM de MOLA y centralizado en zonas de importancia estructural previamente seleccionadas que se consideran que puedan aportar a dilucidar una cronología para la formación del Noctis Labyrinthus.

Adicionalmente, también se hizo el estudio de perfiles generales del Noctis Labyrinthus, con tal de poder comparar sus características con otros lugares en la Tierra que pudiesen homologarse. Es por ello por lo que se tuvieron en cuenta parámetros que se resumirán a continuación:

Altura (A): Se considerará un valor alto a aquellos de $A > 6.000$ m.s.n.m.; un valor medio correspondiente al segmento $3.000 < A < 6.000$ m.s.n.m. y bajo a los valores de altura $A < 3.000$ m.s.n.m. Cabe decir que se tendrá en cuenta netamente a las alturas aproximadas generadas por los perfiles.

Morfologías volcánicas: Todo rasgo superficial atribuible a un proceso volcánico o desarrollo de una estructura volcánica (volcanes, calderas, conos de ceniza o vents) activa o inactiva.

Cuencas profundas: Serán consideradas profundas si su depocentro posee > 2.000 metros de profundidad; será un valor medio si se encuentra en el segmento $1.000 < 2.000$ metros; y no se considerarán profundas si posee valores < 1.000 metros.

Cuencas irregulares (morfología): Cuando el conjunto de cuencas vistas en el perfil sean morfológicamente distintas entre ellas y, además, presenten irregularidades topográficas dentro de la misma cuenca, se considerará que son cuencas irregulares.

Frecuencia de cuencas: Cuando el conjunto de cuencas vistas en el perfil estén dispuestas de manera irregular, sin ninguna constancia o ritmo entre ellas se considerará como una frecuencia “irregular” y, en caso contrario, “regular”. En caso de que sea una combinación de ambos, se considerará como “medio”. Además, si hay gran frecuencia de cuencas, esta se considerará “alta”, mientras que si es menor o muy baja, será considerada “media” o “baja” según corresponda.

3 Marco geológico

La región de Tharsis puede considerarse, en su mayoría, de origen volcánico. Esto debido a la presencia de grandes volcanes de escudo como lo es el Monte Olimpo, Alba Patera o los Montes de Tharsis, todos teniendo una altura de superior a los 6 kilómetros, con el Monte Olimpo llegando incluso sobre los 20 kilómetros.

Si bien hasta hoy en día es una teoría algo controvertida, se cree que la región de Tharsis, al tener estos volcanes en escudo tan altos y en gran cantidad, pudo haber sido influenciada no solo por una, sino que varias plumas mantélicas que podrían o no compartir el mismo hot-spot (Janle y Erkul, 1991).

Esta tendencia a tener una geología de origen volcánico se acrecienta naturalmente al acercarse al perímetro de los volcanes, cosa que ocurre con la ubicación del Noctis Labyrinthus, que incluso hallándose a unos 400 km (su zona más proximal) de los Montes de Tharsis, es alcanzado por la lava de estos.

A pesar de su aparente homogeneidad composicional con respecto a su origen volcánico (en su mayoría unidades de lava), se pueden distinguir diferentes unidades que destacan por corresponder a las tres diferentes épocas conocidas y confirmadas de Marte: Noéico, Hespérico y Amazónico. Más aun, también se pueden distinguir unidades de origen sedimentario, correspondientes a depósitos fluviales y aluviales, por decir algunos, lo que es indicativo de un relieve activo en el pasado.

3.1 Unidades Geológicas

Como se mencionó anteriormente, al tener edades relativas para ciertas unidades en Marte, se tuvo que generar también una escala geológica marciana. La primera estratigrafía que fue presentada formalmente fue la hecha por Scott y Carr (1978). Luego, gracias al conteo de cráteres de Condit (1978) con imágenes de la sondas Mariner 9 y Viking, se establecieron edades para ciertas

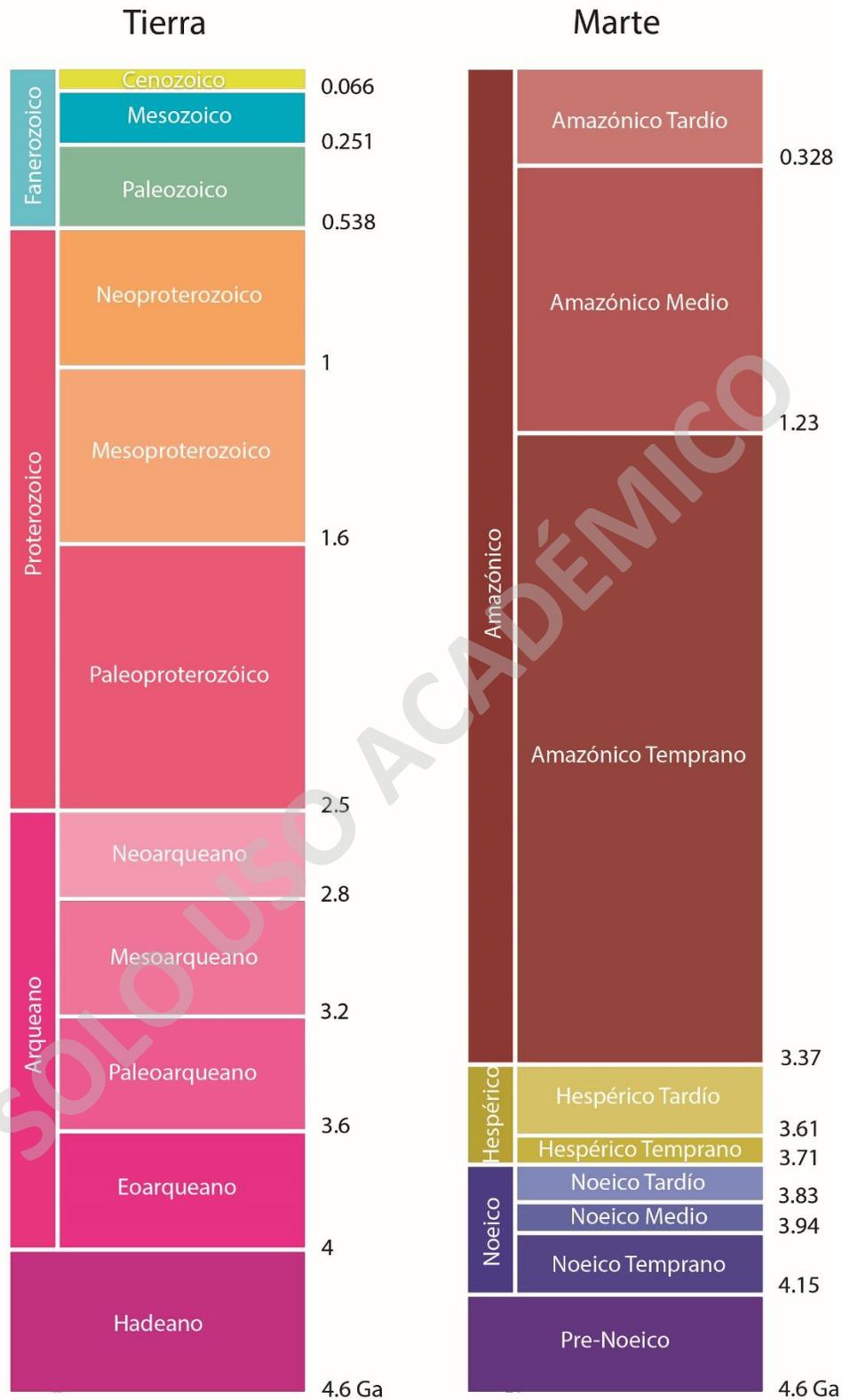


Figura 9: Comparación de edades geológicas entre la Tierra y Marte. Por convención, se utiliza el límite de 4.6 Ga a pesar de que las edades máximas de ambos planetas están alrededor de los ~4.55 Ga.

unidades, las cuales finalmente se englobaron en tres sistemas estratigráficos: el sistema Noéico, el sistema Hespérico y el sistema Amazónico, cada uno recibiendo su nombre de acuerdo con la región más representativa de cada sistema (Tanaka, 1986).

Si bien los nombres de cada época han permanecido en el tiempo, las edades asociadas a estos han variado con el tiempo gracias tanto a la mejor obtención de imágenes para hacer conteos de cráteres más precisos como a las mejoras en la técnica del conteo de cráteres en sí. Hasta hoy en día la cronología basada en conteo de cráteres más aceptada o usada, es la de Neukum en Hartmann y Neukum (2001), la cual es también utilizada por Tanaka et al. (2014) para realizar el mapa geológico de Marte.

Aunque se puede pensar que son escalas muy diferentes, lo cierto es que la escala geológica de Marte podría ser casi equivalente a la de la Tierra, con edades muy similares de formación, dejando a Marte con ~4.5 Ga. (Nimmo y Tanaka, 2005; Hartmann y Neukum, 2001). Siendo así, ambas escalas geológicas pueden perfectamente compararse para tener una idea más clara de las equivalencias de las épocas de Marte a las de la Tierra (Figura 9).

A continuación, se presentan las unidades de la zona de estudio (Figura 10) y sus descripciones según el mismo trabajo de Tanaka et al. (2014).

3.1.1 Unidades Noéicas

3.1.1.1 Unidad indivisa de tierras altas del Noéico – Nhu

Materiales indiferenciados volcánicos, de impacto y sedimentarios. Forman paredes de cañones y algunas llanuras altas y canales. Estratificada. Cientos de metros a varios kilómetros de espesor en zonas expuestas.

3.1.2 Unidades Hespéricas

3.1.2.1 Unidad de transición del Hespérico tardío - IHt

Materiales de remociones en masa, fluviales/lacustres y posiblemente otros materiales sedimentarios y rocas volcánicas. Depósitos formadores de llanuras, relativamente lisas; incluye pequeños colinas suaves y mesetas del Noéico y quizás material más joven. Puede ser de decenas a cientos de metros de espesor.

3.1.2.2 Unidad volcánica del Hespérico tardío - IHv

Basaltos de inundación y grandes flujos de lava, indiferenciados, con fuente en sistemas de fisuras regionales y sistemas de respiraderos. Flujos lobulados, metros a decenas de metros de espesor y decenas a cientos de kilómetros de largo; forman parches de cientos a más de mil kilómetros. Cientos de metros o más como el total de su espesor.

3.1.2.3 Unidad de campo volcánico del Hespérico tardío – IHvf

Caracterizada por volcanes y flujos de lavas distribuidos en parches que cubren áreas de escalas kilométricas. Presentan unidades de flujo con superficies lobuladas provenientes de volcanes escudos y fisuras que alcanzan decenas de kilómetros de extensión.

3.1.3 Unidades Hespéricas – Amazónicas

3.1.3.1 Unidad de impacto del Hespérico y Amazónico – Ahi

Rocas y brechas de impacto, con áreas de fundición por impacto. Es común como relleno de cráteres, junto con sedimentos fluvial-lacustres y eólicos, además de remociones en masa post impacto.

3.1.3.2 Unidad volcánica del Hespérico y Amazónico - AHv

Basaltos de inundación y grandes flujos de lava, indiferenciados, con fuente en sistemas de fisuras regionales y sistemas de respiraderos. Edades altamente variables de flujos individuales, aunque generalmente más jóvenes en partes centrales de Tharsis.

3.1.4 Unidades Amazónicas

3.1.4.1 Unidad de campo volcánico del Amazónico tardío - IAvf

Flujos de lava y respiraderos mayormente sin modificar. Cada flujo es típicamente de decenas de kilómetros de largo, extendiéndose desde volcanes en escudo y respiraderos de fisura hasta decenas de kilómetros. De metros a al menos decenas de metros de ancho.

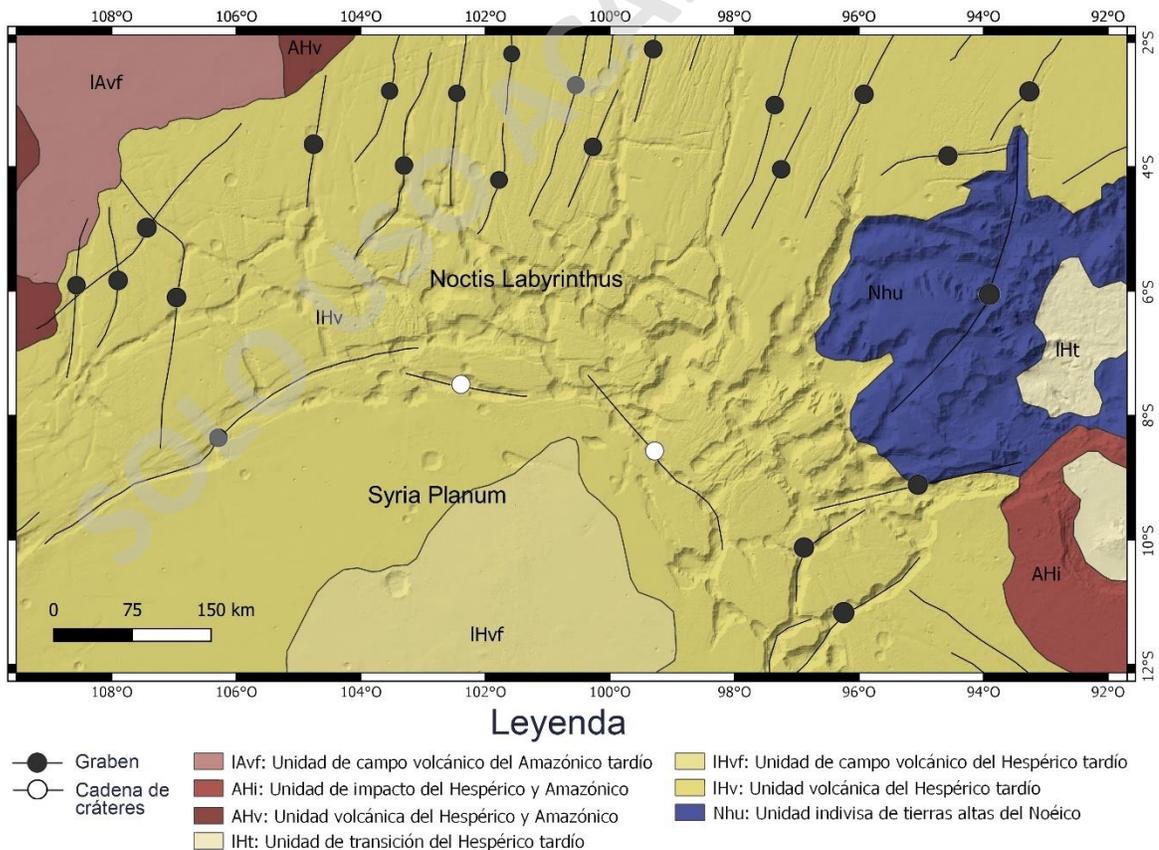


Figura 10: Mapa geológico de Noctis Labyrinthus. Basado en Tanaka et al., (2014). Escala 1:4.000.000.

3.2 Geología Estructural

3.2.1 Noctis Labyrinthus

Hasta hoy en día hay cierta controversia acerca de la geología estructural de la zona de estudio e incluso del resto de Marte. Variadas propuestas se han hecho respecto al Noctis Labyrinthus (Figura 11), algunas más detalladas que otras, siendo de las más recientes y detalladas la de Bistacchi et al. (2003). En su estudio, menciona que los rasgos que evidencian la ocurrencia de deformación corresponden mayormente a fallas transtensionales y la formación de cuencas controladas por la cinemática de estas estructuras. Las cuencas de por sí también tienen distintas características, pero se distinguen en su mayoría por ser “pull apart” y/o en *echelón*.

Además de lo anterior, distingue dos fases tectónicas en el sector, siendo la primera correspondiente a una transtensión sinistral que se ve reflejada en fallas NNE en la zona norte del Noctis Labyrinthus. La segunda, asociada a los movimientos extensivos del Valles Marineris, corresponde a una extensión NNE-SSW que es más evidente en la zona sur del Noctis Labyrinthus y que puede verse afectada previamente por la primera fase mencionada (Bistacchi et al. 2003).

Otra propuesta de una posible temporalidad de diversas fases tectónicas la proponen Tanaka y Davis (1988), con seis fases atribuidas a los distintos sets de lineamientos que plantea en su estudio que, además, incluye parte del Valles Marineris y la totalidad de Claritas Fossae y Syria Planum.

Estudios algo más regionales y bastante más generales indican al Noctis Labyrinthus como una zona de triple conjunción entre placas tectónicas (Courtillot, 1975), con el Valles Marineris y Claritas Fossae siendo límites transformantes, mientras que habría un tercer supuesto límite extensivo hacia el norte del Noctis Labyrinthus y que pasaría por el Asraeus Mons.

Por otro lado, Yin (2012) habla del Noctis Labyrinthus meramente como una zona extensiva que, tal como dijo Bistacchi et al. (2003), estaría influenciada por los movimientos del Valles Marineris.

Sin embargo, en vez de considerar movimientos extensivos en dirección NNE-SSW, propone al Valles Marineris como una zona transtensional, con prevalencia de una cinemática sinistral.

3.2.2 Meseta de Thaumasia

Con respecto a la geología estructural de los alrededores del Noctis Labyrinthus (especialmente la meseta de Thaumasia y sus límites) se podría decir que cuenta también con una interesante variabilidad de propuestas (Figura 11) a lo largo de los años, siendo una de las primeras la de Courtillot (1975) mencionada en el punto anterior.

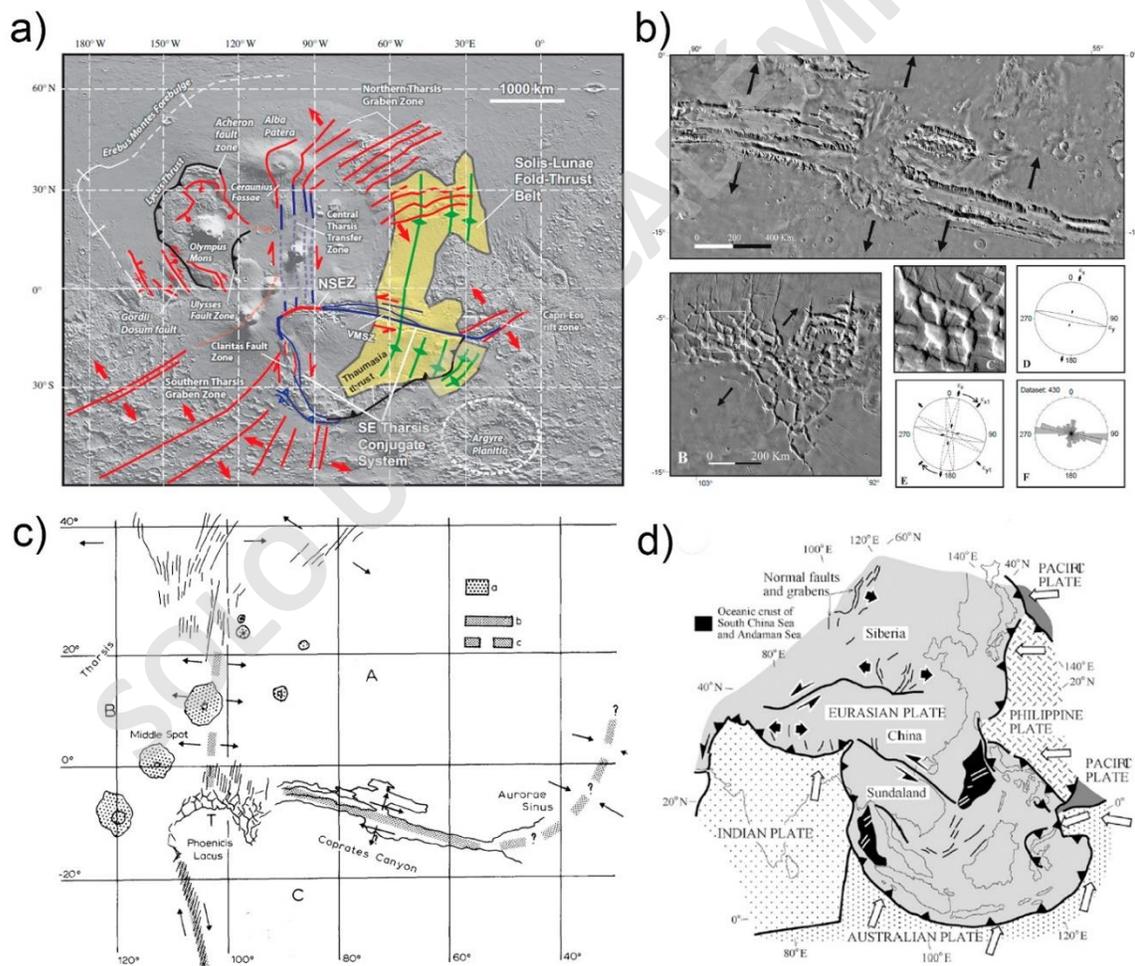


Figura 11: Propuestas estructurales para el Noctis Labyrinthus y la región de Tharsis en general. (a) Mapa estructural de Tharsis (Yin, 2012); (b) Propuesta de deformación del Noctis Labyrinthus y Valles Marineris (Bistacchi et al., 2003); (c) Mapa estructural centra en el Noctis Labyrinthus y sus alrededores (Courtillot, 1975); (d) Propuesta de movimientos tectónicos sobre el sureste de la meseta de Thaumasia (Anguita et al., 2006).

Yin (2012) también hace su propuesta con respecto al Valles Marineris, también mencionada anteriormente, solo que adiciona también un comportamiento transtensional con cinemática dextral y además extensional en algunas zonas de Claritas Fossae, a la cual además se refiere como Falla Claritas. Sumado a lo anterior, también reconoce la preponderancia de fallas inversas de cabalgamiento en Thaumasia Highlands y Coprates Rise. Adicionalmente, también habla de la zona de transferencia de Tharsis central, la cual va desde el Noctis Labyrinthus hasta el volcán Alba Patera en el norte, pasando por el Ascræus Mons, cosa bastante similar a la propuesta de Courtillot (1975) sobre un límite extensivo en la misma posición.

Un estudio quizás más alejado pero que también tendría influencia en la meseta de Thaumasia y, probablemente, sobre el Noctis Labyrinthus o sus alrededores, es el de Anguita et al. (2006), donde propone que las Thaumasia Highlands son producto de una convergencia entre placas, similar a lo que ocurre con la placa de la India y la Euroasiática.

SOLO USO ACADÉMICO

4 Resultados

4.1 Análisis de lineamientos

Como fue mencionado durante el capítulo de Marco Teórico, se hizo un mapeo y posterior análisis de lineamientos teniendo en cuenta las características de desplazamiento y relaciones de corte. Este análisis resultó en la generación de un mapa de (Figura 12), diagramas de rosa (Figura 13) e histogramas (Figura 14). Paralelamente, se generó un mapa con los valles y cuencas marcados, aplicando el mismo criterio de los lineamientos y, de hecho, muchas veces superponiéndose al mapeo de lineamientos (Figura 15).

Tanto en el mapeo de lineamientos como en el de cuencas se hace la salvedad de no incluir aquellas unidades consideradas como cadenas de cráteres. Otro punto a considerar, es que la zona hacia el este, correspondiente al inicio del Valles Marineris, está, en gran parte, sin lineamientos mapeados. Esto simplemente debido a la dificultad de encontrar lineamientos y direcciones suficientemente claros.

Dentro de las tres categorías de lineamientos, se determinó que los que más abundan son los del grupo 2, con 440. Luego, tanto el grupo 3 como el 1, tienen cantidades similares, siendo 116 y 110 respectivamente.

A simple vista, los lineamientos categorizados parecieran tener cierta tendencia en sus direcciones, cosa que se comprueba en los diagramas de rosa antes mencionados (Figura 13). Esto se aprecia especialmente en los lineamientos de los grupos 2 y 3, donde se ven tendencias en dirección NNE-SSW y NW-SE respectivamente. Aun así, incluso si el grupo 3 presenta una tendencia NW-SE, tiene un segundo orden donde predomina la dirección en NNW-SSW. Para el caso del grupo 1, si bien hay varias tendencias, destaca la dirección NNE-SSW.

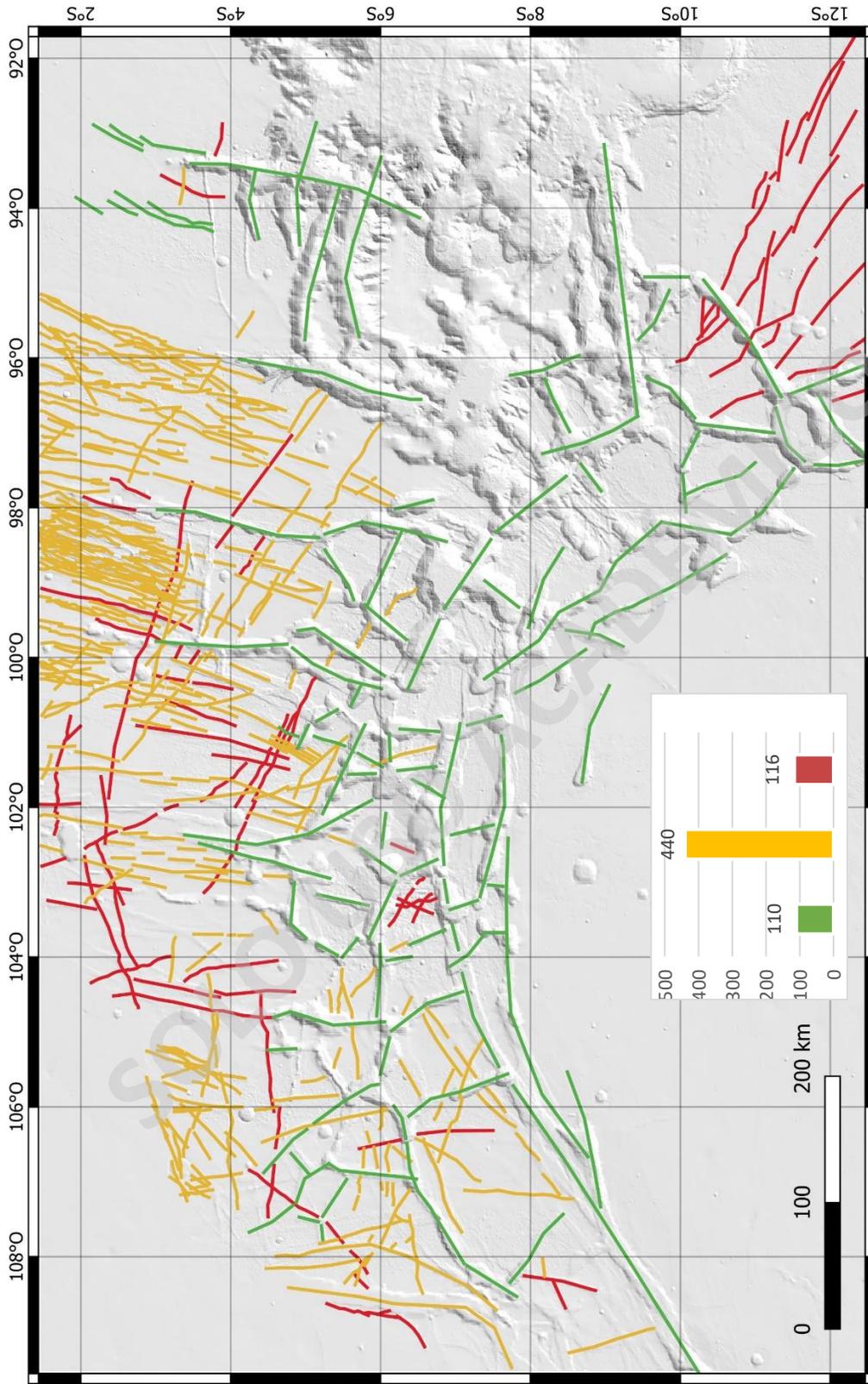


Figura 12. Mapa de lineamientos. Están divididos en las tres categorías mencionadas anteriormente y superpuestos al DEM de MOLA. En su esquina inferior izquierda se observa un diagrama con la cantidad de lineamientos de acuerdo con cada categoría. Escala 1:4.000.000.

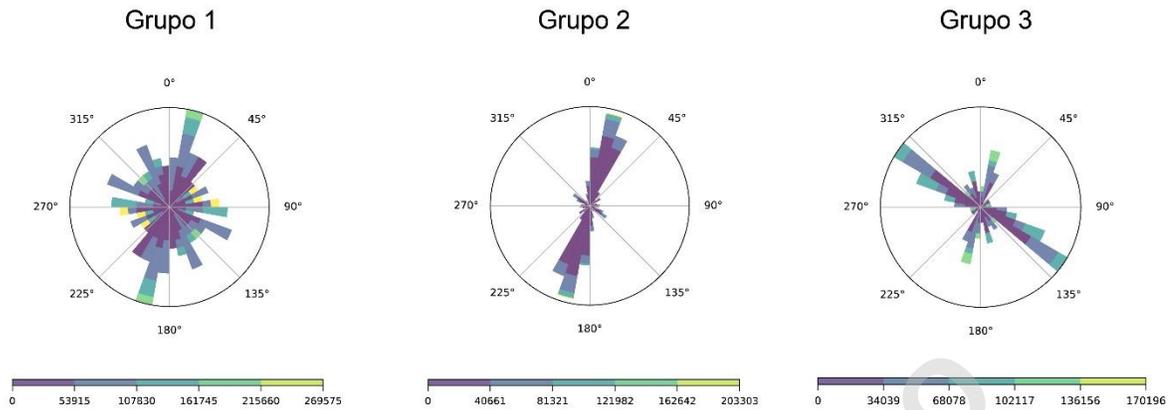


Figura 13: Diagramas de rosa de cada clasificación de lineamientos. Bajo estos se encuentran un esquema con los distintos largos encontrados en cada grupo de lineamientos, separados por colores cada cierto rango para poder observar las diferencias de largos de lineamientos en cada diagrama de rosa.

En cuanto a los histogramas se refiere (Figura 14), el grupo 2 es el que presenta mayor cantidad de lineamientos que no sobrepasan el primer quintil, esto más que nada debido a la gran cantidad de lineamientos que existen en este grupo. Otra particularidad de los histogramas es que el grupo 1 es el que tiene mayor cantidad de lineamientos correspondientes al último quintil, es decir, es el grupo que tiene mayor cantidad de lineamientos de mayor largo. En este caso, superando los 215 km.

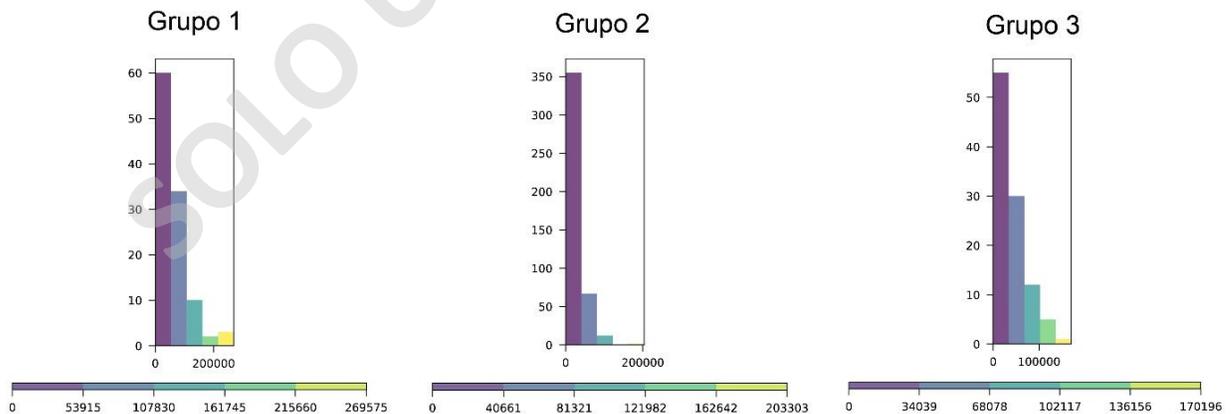


Figura 14: Histogramas de largo de lineamientos. Estos están separados por rango de colores en las barras de más abajo, mientras que los histogramas muestran la cantidad de lineamientos correspondiente a cada color.

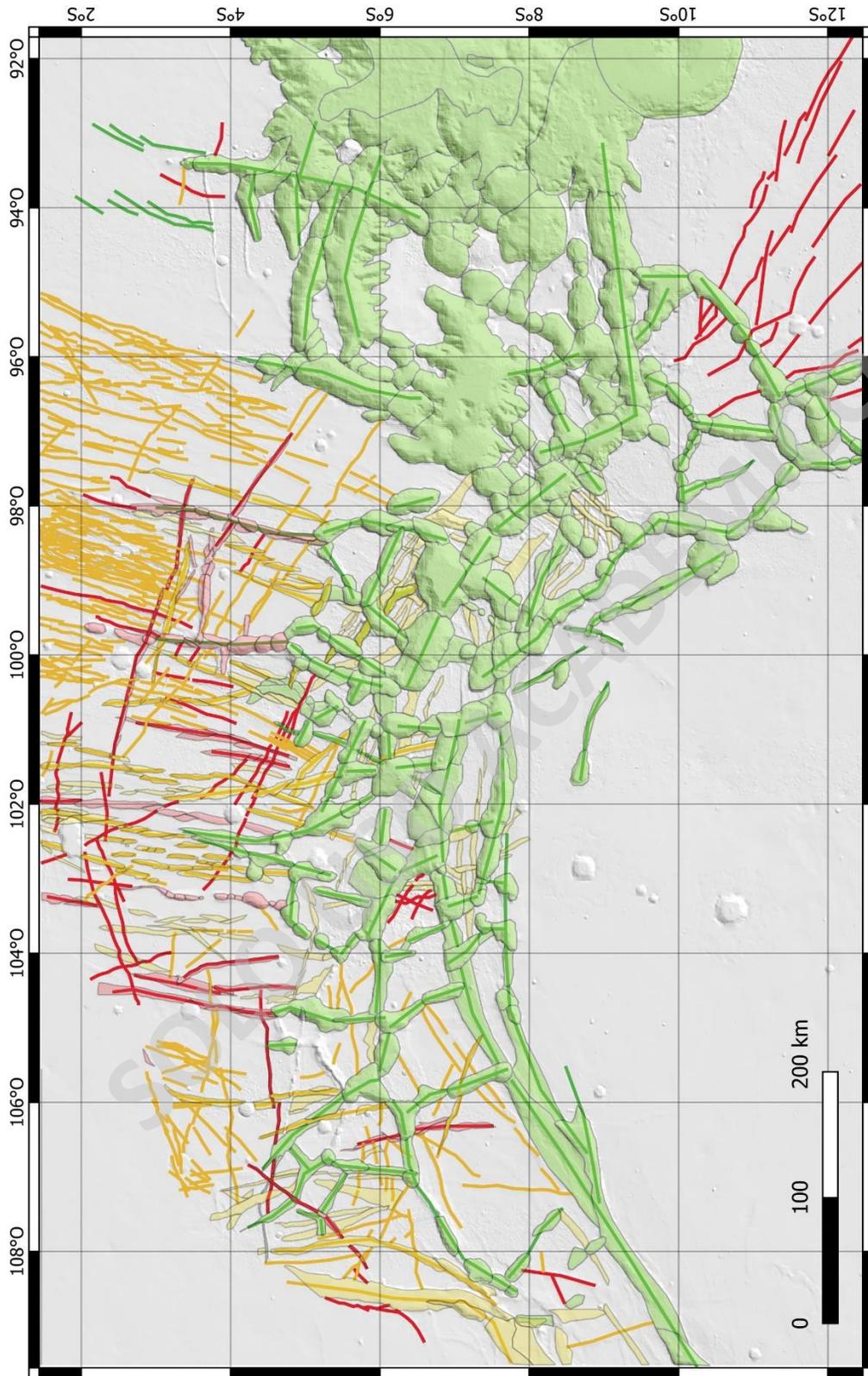


Figura 15: Mapa de lineamientos y cuencas. Al mapeo de lineamientos se agrega también el mapeo de cuencas. Escala 1:4.000.000. Se aplica la misma clasificación por colores a las cuencas y, a modo general, estas coinciden con las clasificaciones de los lineamientos, pero hay excepciones.

Por último, en cuanto al mapeo de cuencas (Figura 15), este se realizó principalmente para tener en consideración el ancho de cada lineamiento y para mapear aquellas cuencas que con el método de los lineamientos no se había podido lograr, como ocurre con la zona del este, al comienzo del Valles Marineris.

Adicionalmente, a pesar de los lineamientos, las zonas en las que fueron mapeados quedan ahora subdivididas en cuencas, lo que ayuda aún más al entendimiento de los movimientos de la zona y clasificación de distintas morfologías. Dentro de las morfologías halladas se encuentran cuencas en echelón y cuencas pull-apart. Cabe decir que los colores utilizados para las cuencas son los mismos para sus correspondientes lineamientos.

Otras excepciones que se realizaron en cuanto al mapeo de cuencas es el evitar morfologías similares como cadenas de cráteres y cráteres de impacto. A su vez, también se optó por integrar el extremo oeste del Valles Marineris al mapeo de cuencas. Esta zona se clasificó dentro del conjunto del Grupo 1, correspondiente a la estructura principal del Noctis Labyrinthus debido a que las cuencas están conectadas entre sí.

4.2 Estimación de edades

Estimaciones anteriores a las realizadas en esta área de estudio (Tanaka et al., 2014; Bouley et al., 2018) sitúan al Noctis Labyrinthus o, más bien, a la unidad que lo engloba, IHv, dentro del Hespérico Tardío. Esto considerándolo como una sola unidad y no separándolo por subunidades.

Al hacer un ejercicio similar a Tanaka et al. (2014), es decir, haciendo un conteo de cráteres de toda la zona de estudio, que es similar a la definición de la unidad IHv, se obtuvo un resultado bastante similar (Figura 16).

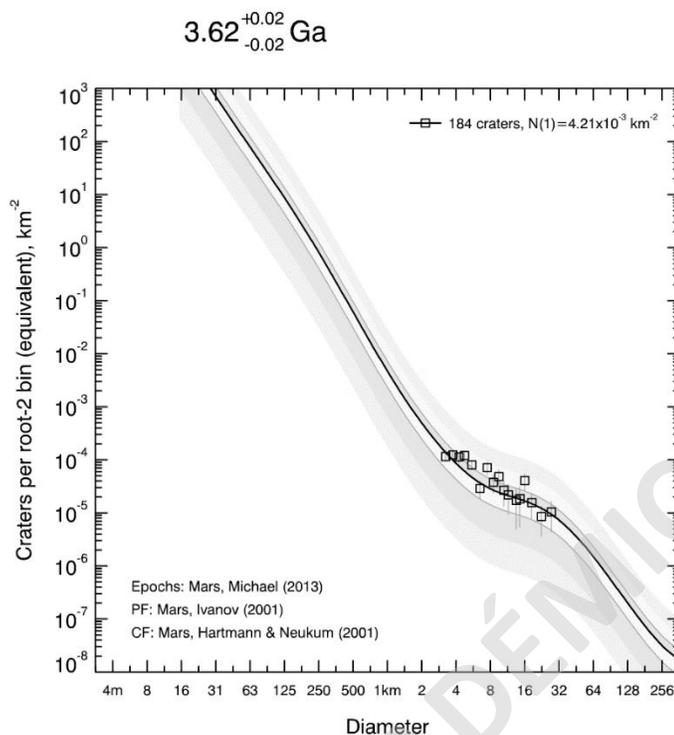


Figura 16: *Conteo de cráteres general de la zona de estudio sin distinción de unidades.*

La zona en general como resultado da 3,62 Ga, muy similar al obtenido por Tanaka et al. (2014) que es de 3,63 Ga y que sitúa a la zona, como un todo, dentro del Hespérico Temprano (aunque Tanaka et al. (2014) considera el error de cálculo y decide otorgarle la edad más joven, siendo el Hespérico Tardío) como se mencionó anteriormente.

Teniendo el antecedente de que el conteo de cráteres con los parámetros elegidos (contar solo cráteres de 3 km o más) da como resultado una edad muy similar a la propuesta por Tanaka et al. (2014), se procedió a hacer un conteo por unidad. Para realizar esto, se hizo una fotointerpretación para diferenciar distintas unidades, logrando esto a través de la observación de relaciones de corte, cambio de colores, cambio de texturas e inercia termal. También se tuvieron en cuenta unidades ya especificadas por Tanaka et al. (2014) que rodean al Noctis Labyrinthus y que están dentro de la zona de estudio. Es así como se obtuvo un mapa preliminar con unidades principales con cierta temporalidad relativa (Figura 17).

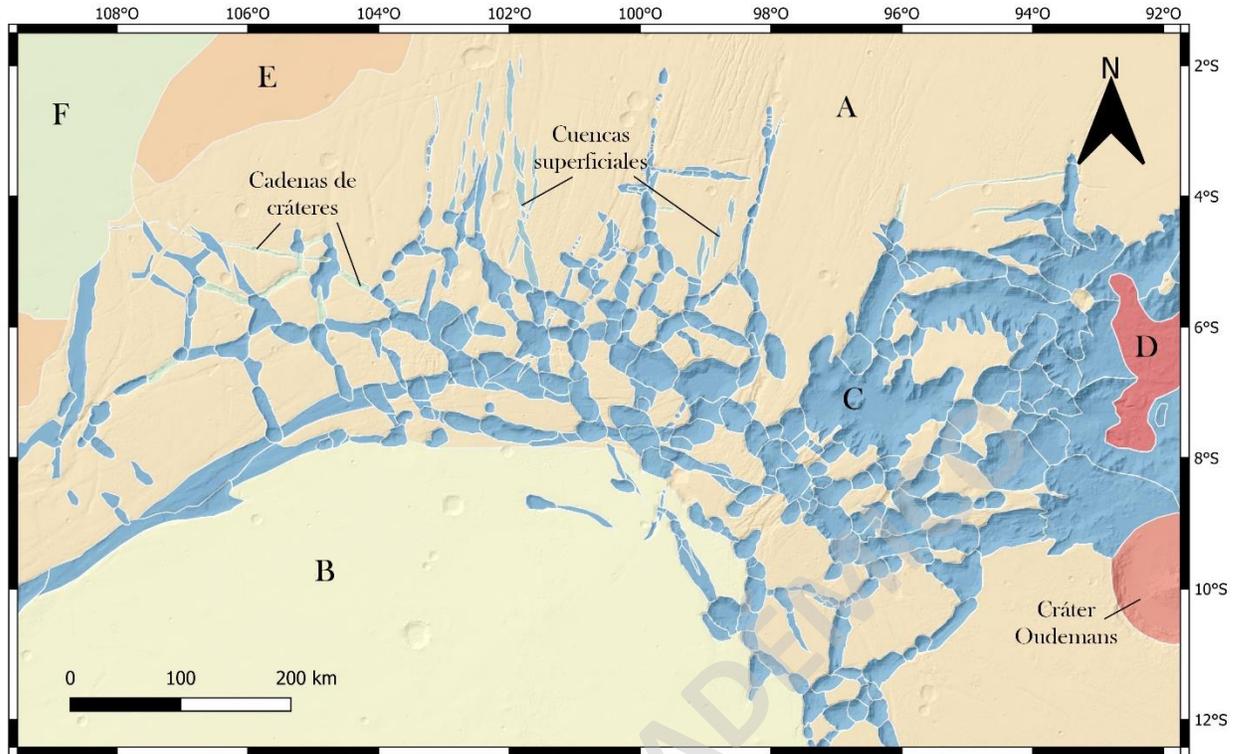


Figura 17: Mapa con unidades geológicas principales preliminares. Solo las unidades con letra son consideradas principales, siendo la más antigua A y la más reciente E. Los colores no tienen relevancia temporal ni representan alguna característica de composición u origen, solo están para diferenciar las distintas unidades entre sí. Las unidades más pequeñas, consideradas más que nada morfologías (cadenas de cráteres, cuencas superficiales, cráter Oudemans) no se tuvieron en cuenta a la hora del conteo de cráteres.

Las estimaciones hechas en el presente estudio se hicieron por cada unidad definida en el mapa geológico generado anteriormente y teniendo en cuenta cráteres de 3 km o más. Esto conlleva a ciertas limitaciones como, por ejemplo, que la unidad D no posea cráteres dentro del criterio y, por tanto, no se pueda cuantificar su edad, aunque por criterio de relaciones de corte se asume como más reciente que la unidad C.

Otra de las limitaciones es que dentro de la zona de estudio no se encuentra la totalidad de cada una de las unidades geológicas definidas, lo cual naturalmente genera cierta incertidumbre en los resultados. Esto ocurrió con las unidades E y F en mucho mayor grado.

Adicionalmente, se tuvo en cuenta la escala de tiempo del sistema cronológico de Neukum (Hartman y Neukum, 2001) definida por Michael, (2013) para definir las edades, pues es la utilizada por Tanaka et al. (2014).

La unidad con menor error y una edad más precisa según las técnicas de contabilización es la unidad A. Esta, al ser la que mejor se ajusta a la isócrona del modelo y además siendo la que cubre gran parte del mapa, se ha designado como base temporal para las demás unidades. Esto además es reafirmado por el principio de relaciones de corte, que la muestra como la unidad más antigua. A las otras dos unidades a las que se les hará más énfasis son B y C, ya que son las siguientes unidades de mayor tamaño y que contienen mayor cantidad de cráteres.

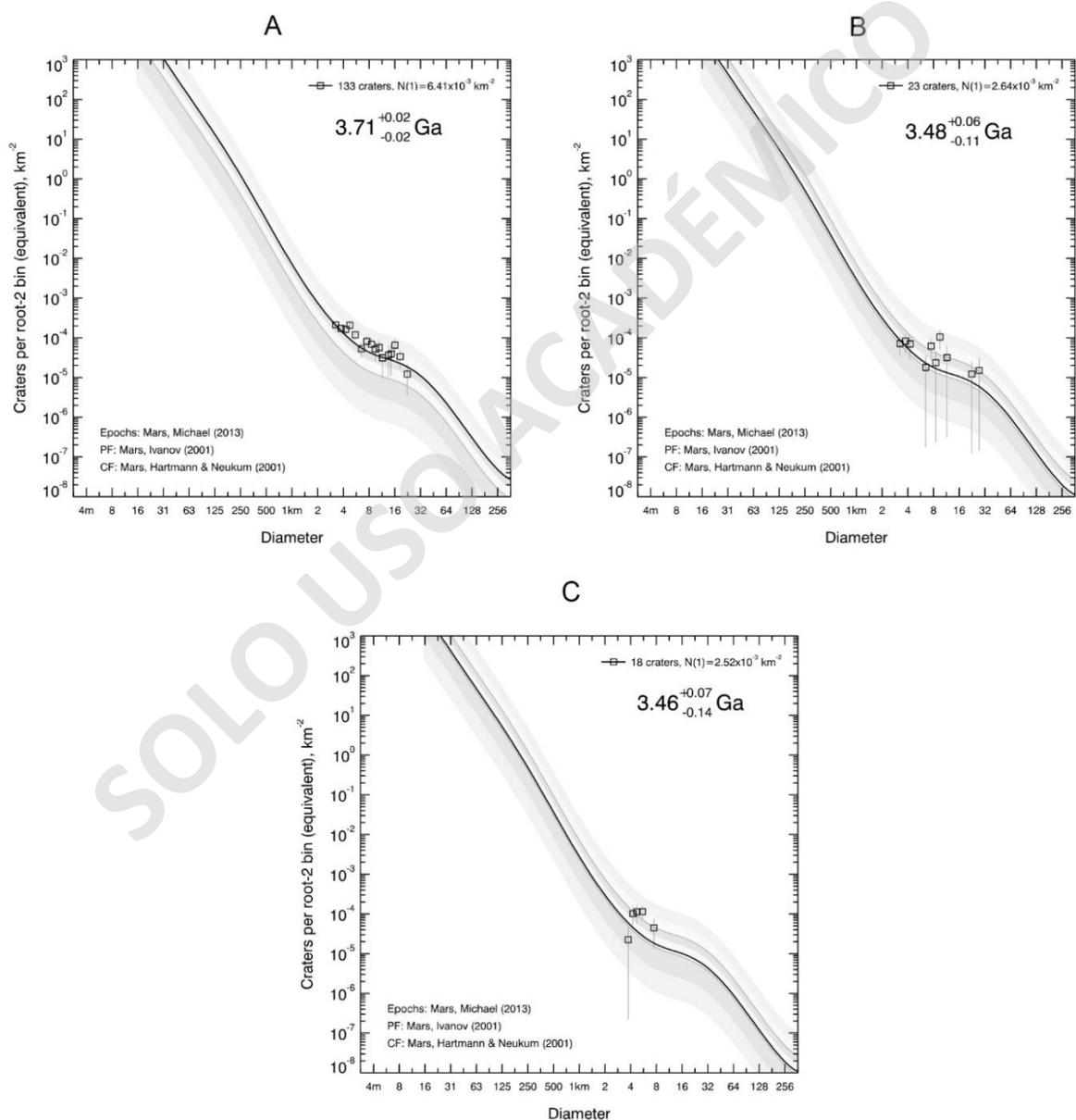


Figura 18: Conteo de cráteres de unidades principales. Se consideran las unidades A, B y C.

Como se observa en los gráficos (Figura 18), la unidad A es la que contiene una mayor cantidad de cráteres contados y, además, la más antigua, de aproximadamente 3,71 Ga, lo que la sitúa en el límite entre el Noéico Tardío y el Hespérico Temprano, sin embargo, por convención, se considerará parte de la época más reciente. El hecho de que es la de mayor edad de entre todas las unidades coincide con la suposición de que A es la unidad más antigua considerando tan solo el principio de relaciones de corte.

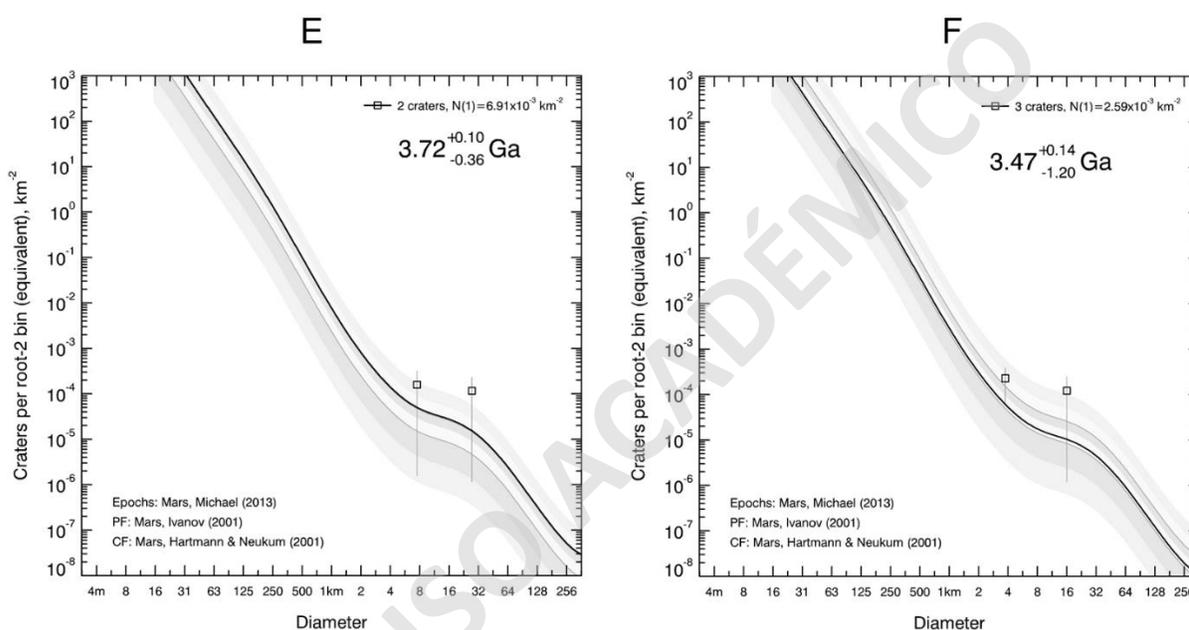


Figura 19: Conteo de cráteres de unidades principales. Se consideran las unidades E y F.

Siguiendo con el principio de relaciones de corte, la siguiente unidad sería B, lo cual nuevamente se reafirma con el conteo de cráteres, que le da una edad de aproximadamente de 3,48 Ga, situándola dentro del Hespérico Tardío. Luego, con la unidad C ocurre lo mismo. Coincide con el principio de relaciones de corte y su edad es más reciente que B, aunque no por mucho, pues es de aproximadamente de 3,46 Ga y con un error de +0,07 y -0,14, por lo que no es totalmente determinante.

Por otro lado, las unidades E y F (Figura 19), a pesar de que fueron contabilizadas dentro del conteo de cráteres, estas se basan en el conteo de dos cráteres por cada unidad, por lo que los resultados dados en los gráficos no fueron conclusivos. Cabe decir que la unidad E reflejó una edad

correspondiente a los 3,72 Ga, posicionándola en el Noéico Tardío, lo cual no debería ser posible al tener en consideración las relaciones de corte. En cambio, la unidad F obtuvo un resultado de 3,47 Ga, correspondiente al Hespérico Tardío.

Ya que en las unidades D, E y F no se pudieron contabilizar cráteres o estos no fueron suficientes, para la continuidad del estudio se tomarán las edades de Tanaka et al. (2014) equivalentes a estas unidades. Estas son: D = IHt; E = AHv; F = lAvf. Concluyendo con la temporalidad y unidades, también se fijaron nombres para cada unidad de acuerdo con su época geológica y su geología (Tabla 1). Esta geología estuvo basada en las descripciones de Tanaka et al. (2014) referenciadas en el capítulo de Marco Geológico y teniendo en cuenta las características consideradas por medio de la fotointerpretación para generar las distintas unidades.

Tabla 1: Comparación de edades de cada unidad. Para la columna "Edad" se utilizan las edades obtenidas en este estudio, siendo la única excepción la unidad D con N/A (No Aplica) ya que no se pudo obtener su edad. Las épocas marcianas asignadas para A, B y C son las correspondientes a las edades anteriormente obtenidas. Para D, E y F se utilizaron las obtenidas por Tanaka et al. (2014).

Unidad	Edad	Época marciana	Nuevo nombre
A	3.71±0.02	Hespérico Temprano	eHl
B	3.48+0.06/-0.11	Hespérico Tardío	lHl
C	3.46+0.07/-0.14	Hespérico Tardío	lHb
D	N/A	Hespérico Tardío (Tanaka et al., 2014)	lHs
E	3.72+0.10/-0.36	Amazónico Temprano (Tanaka et al., 2014)	eAl
F	3.47+0.14/-1.20	Amazónico Tardío (Tanaka et al., 2014)	lAl

4.3 Mapa Geológico

Tomando como referencia el mapa de Marte de Tanaka et al. (2014), considerando las técnicas analíticas de selección de unidades principales mencionada en el apartado de Metodología, y esto aunado al conteo de cráteres mencionado específicamente en el apartado de Marco Teórico, se ha logrado generar un mapa geológico de la zona de escala 1:4.000.000 (Figura 20).

Si bien hay unidades homólogas a las descritas por Tanaka et al. (2014), la mayoría se ha modificado en términos de sus límites al tener en cuenta la diferente escala a la que se trabaja pues Tanaka et al. (2014) genera el mapa de Marte en la escala 1:20.000.000. Estos límites fueron definidos anteriormente en el apartado 4.3 correspondiente a la Estimación de Edades.

Adicional al reconocimiento de unidades generales en la zona, se hace también un reconocimiento de morfologías particulares, como las cadenas de cráteres, cuencas superficiales en echelón y pull-apart, anillos de cráteres y “vents”, estos últimos extraídos del trabajo de Richardson et al. (2018).

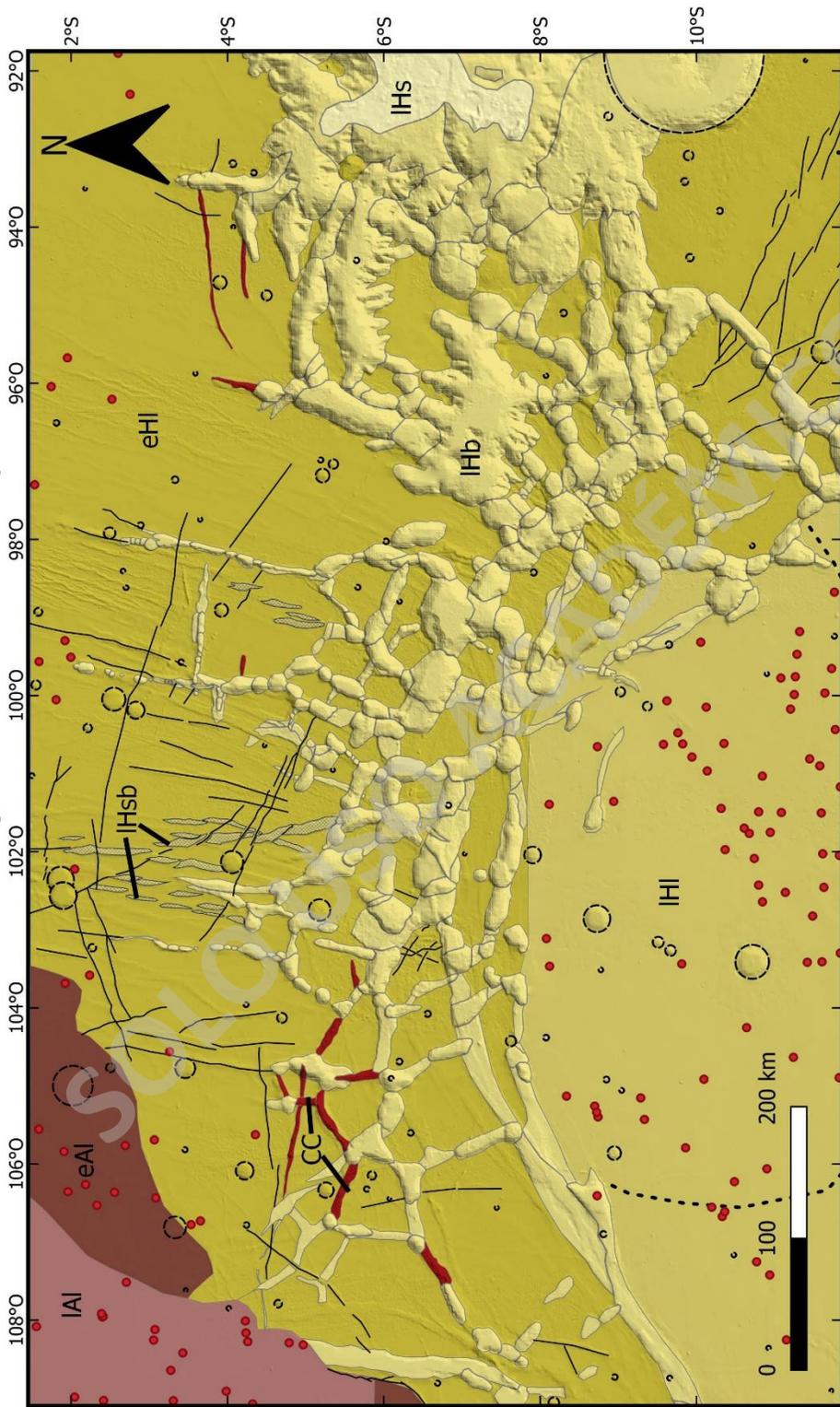
En lo que respecta a las cadenas de cráteres, estas tienden a concentrarse en el NW del Noctis Labyrinthus, coincidentemente más cercanos a los Montes de Tharsis, aunque también se logran apreciar algunas en el lado NE, donde comienza el Valles Marineris. Las cadenas de cráteres observadas tienen gran variación de tamaño, yendo desde los 16 km hasta los 130 km, sin embargo, la mayoría pareciera estar entre los 30 y 50 km.

Las cuencas superficiales son, en su mayoría, en echelón y pull-apart, y las más notorias se ubican en la parte centro norte de la zona de estudio. Las cuencas van desde los ~15km hasta los ~60km de largo y son alargadas en dirección N-S y NNE-SSW.

Los anillos de cráteres corresponden a todos aquellos cráteres marcados en la metodología del conteo de cráteres, por lo que todos son de al menos 3km o más de diámetro, que es la medición que se decidió para este estudio. Cabe decir que el cráter Oudemans, ubicado en el SE de la zona de estudio (Figura 17), si bien está señalado en el mapa, no fue utilizado en el conteo de cráteres al salirse de los límites de la zona y por considerarse que, a la escala del estudio, alteraría los datos de manera negativa por su gran diámetro.

Por otro lado, los denominados vents están esparcidos por toda la zona de estudio salvo en la estructura principal del Noctis Labyrinthus y corresponden en su totalidad al estudio realizado por Richardson et al. (2018), quien además de identificarlos, les dio ciertas direcciones de orientación al presentarse como pequeñas fisuras relacionadas a edificios volcánicos.

Mapa Geológico de Noctis Labyrinthus



Legenda

- Vents
- IAI: Lavas de inundación y grandes flujos de lava del Amazónico Tardío.
- eAI: Lavas de inundación y grandes flujos de lava pertenecientes al Amazónico Temprano.
- IHSb: Cuenclas profundas extensionales y transensionales del Hespérico Tardío.
- IHS: Cuenclas superficiales del Hespérico Tardío. Principalmente cuencas en echelón y pull-apart.
- IHI: Flujos de lava y volcanes del Hespérico Tardío pertenecientes al Syria Planum.
- Cráteres
- Cadenas de Cráteres.
- Límite de inercia termal
- Líneas sedimentario perteneciente al Hespérico Tardío.
- CC: Cadenas de Cráteres.

Figura 20: Mapa geológico de la zona. Escala 1:4.000.000.

Los lineamientos marcados en negro son solo los que corresponderían al Grupo 3 denominado anteriormente y que se describe en la sección de Mapeo Estructural dentro del Marco Teórico y que se puede apreciar en las figuras del capítulo de Resultados, en el apartado de Mapeo de Lineamientos (Figura 12) (Figura 15).

A diferencia de Tanaka et al. (2014), no se tiene en cuenta los eyecta de impacto ni zonas más jóvenes dentro de las mismas unidades. Además, se hace la distinción de un límite marcado por la inercia termal notorio presente en la zona.

4.4 Análisis Geomorfológico

4.4.1 Cadenas de cráteres

Las cadenas de cráteres son cadenas o alineamientos de cráteres que no son de impacto, sino producidos por otros fenómenos geológicos del planeta. Si bien en la Tierra no son muy comunes de ver, estos ocurren en gran cantidad en planetas como Marte. Regiones como Tharsis y Elysium destacan por tener estas estructuras (Leone, 2014).

El Noctis Labyrinthus, al estar en la región de Tharsis, está naturalmente ligado a la existencia de estas cadenas de cráteres, en especial al estar cercano a los Montes de Tharsis (Figura 20). Esto es porque existen distintas maneras en las que podrían formarse estas cadenas de cráteres, tales como: colapso de tubos de lava, intrusión de diques con interacción con la hidrósfera/criósfera, intrusión de diques con volátiles exseltos, intrusión de diques con resultado de una erupción tipo pliniana, colapso de cámara magmática, disolución de karst, fracturas de extensión y fallamiento extensional (Wyrick et al., 2004).

Si bien están presentes en la zona (Figura 20), estos no parecieran ser tan abundantes y tenderían a concentrarse más en el sector NW del Noctis Labyrinthus (Figura 21.a), aunque también se han observado al NE.

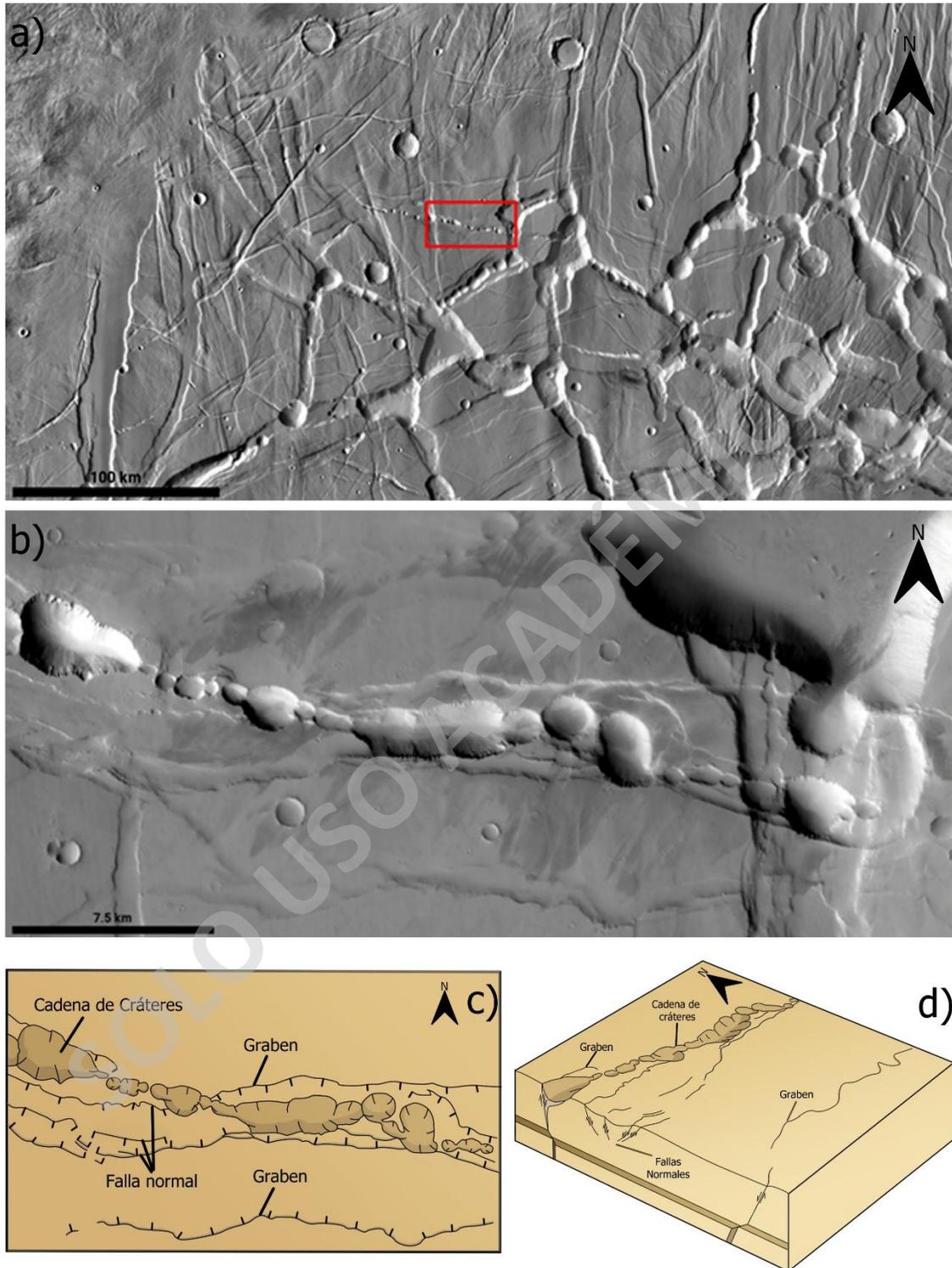


Figura 21: Cadenas de Cráteres. Se muestra en: a) Sector noroeste de la zona de estudio, entre aproximadamente los 250°E a 259°E y los 3°S a 7°S. En rojo la cadena de cráteres a estudiar; b) Cadena de cráteres a estudiar en detalle; c) Esquematización en planta de la cadena de cráteres a estudiar; d) Esquematización tridimensional de la cadena de cráteres a estudiar, basada en los modelos propuestos por Wyrick et al. (2014).

Tomando el estudio de Wyrick et al. (2014), se considera que las cadenas de cráteres son producto de fallamiento extensional (Figura 20.c y 20.d) y fracturas de extensión, sin embargo, tampoco se descarta la intervención de diques por medio de las fallas al estar en una zona volcánica, ya que se ha demostrado en zonas de la Tierra que la formación de estos suele ocurrir como respuesta a procesos magmáticos y fallamiento extensional (Magee, 2022).

4.4.2 Perfiles

Como se ha mencionado anteriormente, la estructura principal del Noctis Labyrinthus, correspondiente también al Grupo 1 de lineamientos, que no parecieran tener cinemáticas claras, es un tanto compleja de clasificar y estudiar, en especial por su forma casi radial. A simple vista, parecieran ser cuencas interconectadas que siguen una especie de semi-círculo, sin embargo, se pueden obtener más datos acerca de esta estructura al hacer perfiles topográficos.

Otra característica que se puede observar a simple vista es que las cuencas de la estructura principal son especialmente profundas, en comparación a las del resto de la zona de estudio. Como se vio anteriormente, por ejemplo, las cuencas superficiales marcadas en el mapa geológico generado (Figura 20) llegan a tener profundidades de unos ~200m. Sin embargo, las cuencas de la estructura principal del Noctis Labyrinthus superan con creces los 200m de profundidad, llegando incluso a los 4km (Figura 22).

Adicional a las cuencas de gran profundidad, también se observan otras características destacables y que se repiten en cada perfil transversal (Figura 22), los cuales tienen un máximo de 10km de altura y un mínimo de 0km, además de un largo máximo de ~530km. Dentro de estas características se aprecia que el Noctis Labyrinthus tiene una altura promedio entre los 6 y 8km. Además, las cuencas son irregulares en forma, tamaño e incluso en la frecuencia en la que aparecen en los perfiles. A esto se suma la clara diferencia entre los perfiles de la zona este con los de la oeste, pues ocurre que, mientras más hacia el este, más profundas son las cuencas (aquí se observan las profundidades de hasta 4km). Finalmente, a cada costado de la estructura principal del Noctis Labyrinthus (dígase, lado norte y lado sur), se observan lo que parecieran ser planicies.

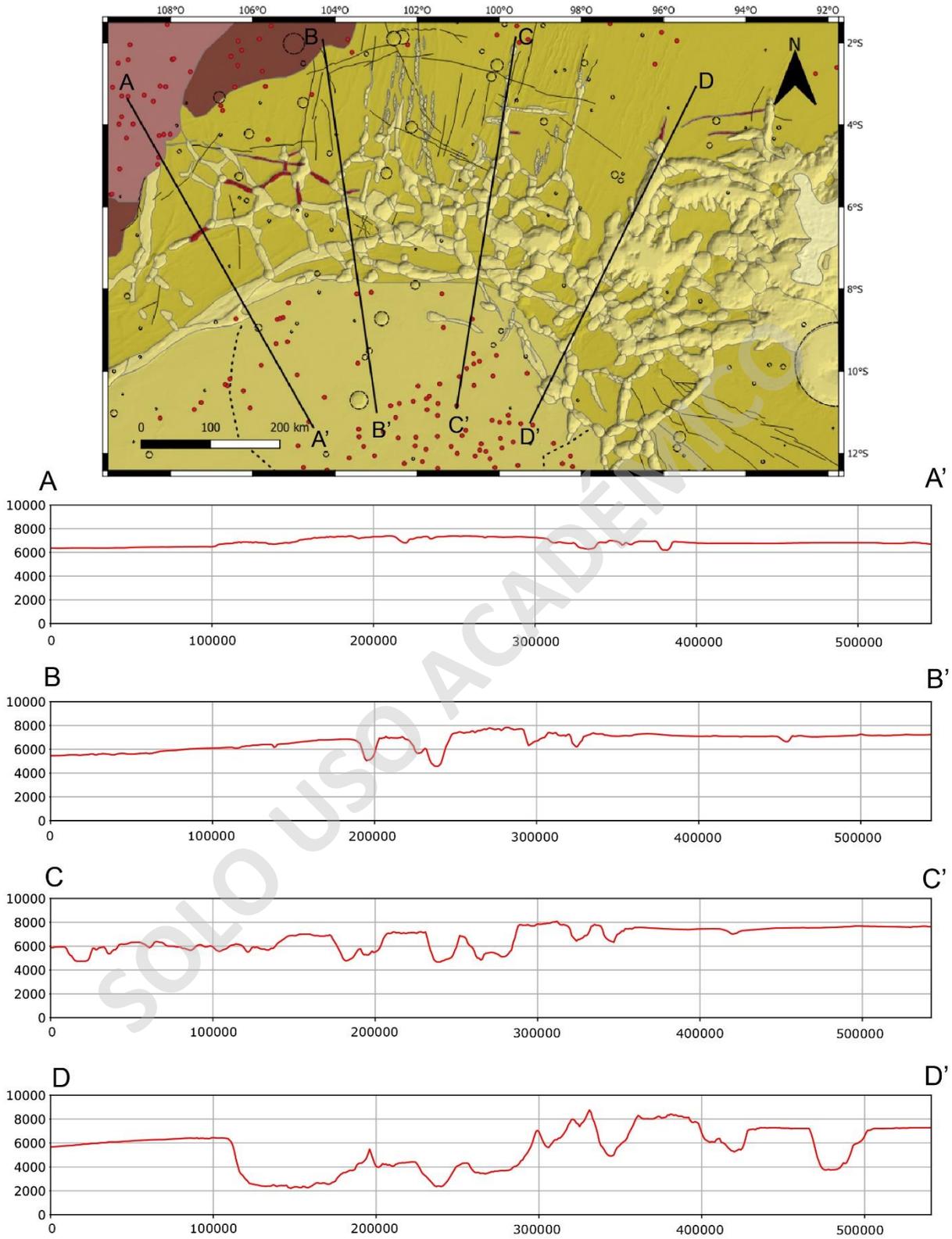


Figura 22: Perfiles transversales al Noctis Labyrinthus de oeste a este.

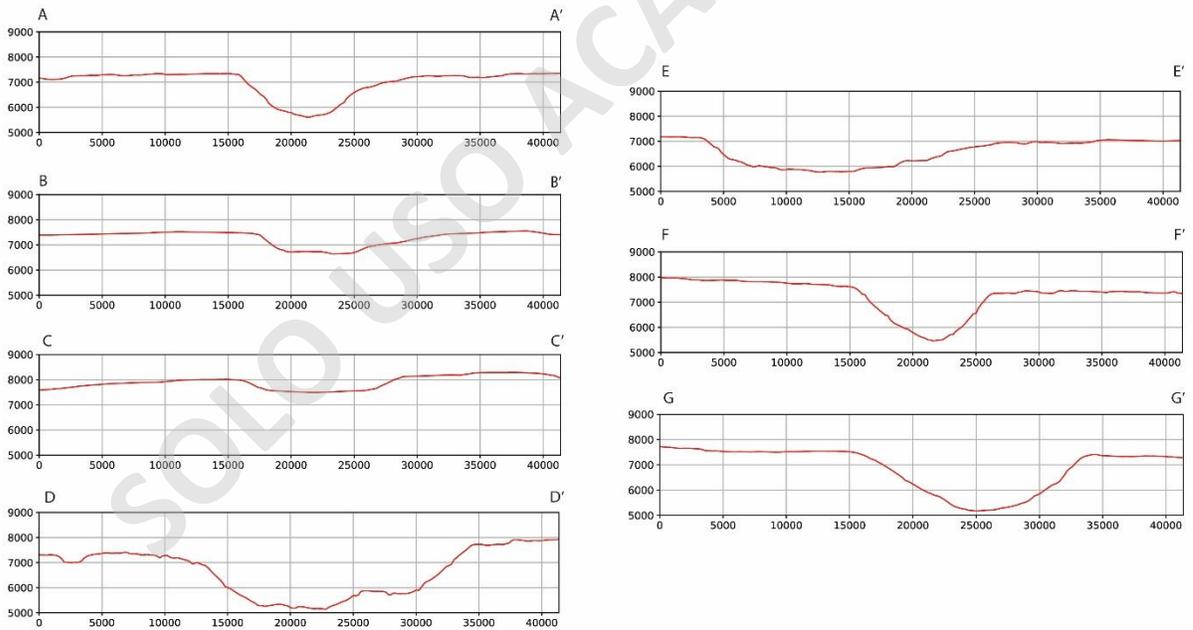
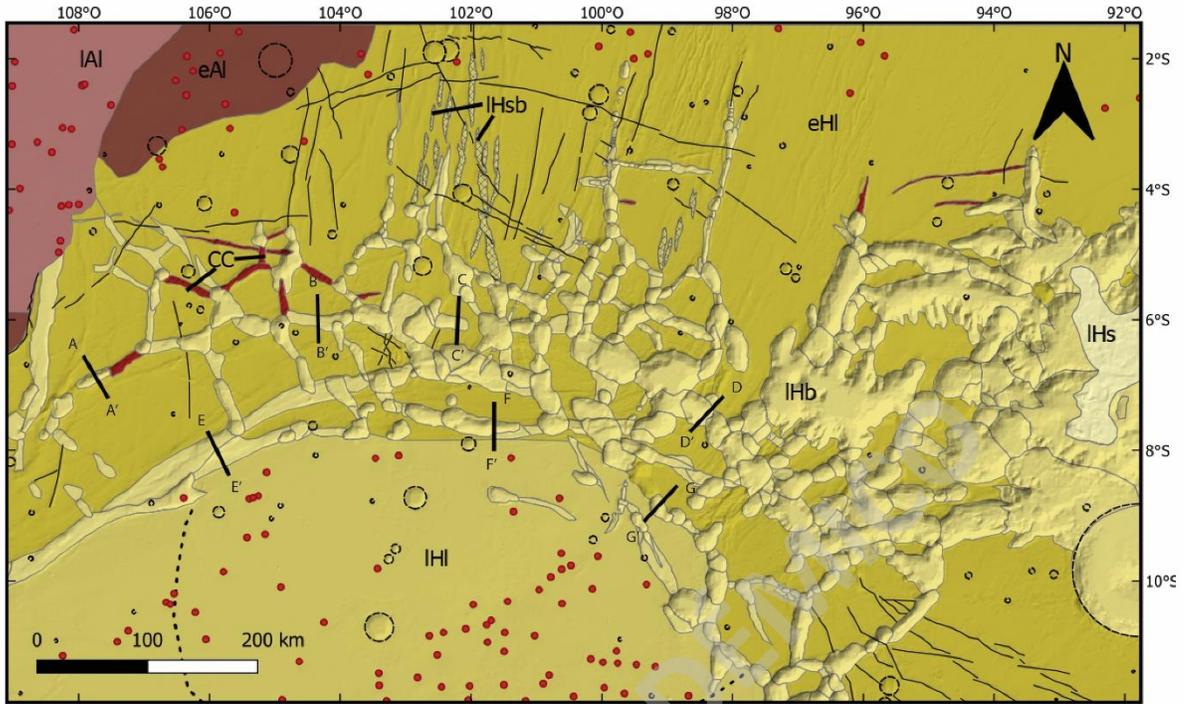


Figura 23: Perfiles en detalle de cuencas a lo largo del Noctis Labyrinthus utilizando el DEM de MOLA. Colores indican mismas unidades del mapa.

Por otro lado, también se optó por generar pequeños perfiles a lo largo del Noctis Labyrinthus (Figura 23). Estos perfiles son de un poco más de ~40km cada uno en la horizontal, con un máximo

de 9km en la vertical y un mínimo de 5km. Cada uno de estos corta perpendicularmente a una cuenca de norte a sur.

Dentro de las primeras generalidades que se pueden observar en los perfiles es la gran profundidad de las cuencas hasta su depocentro. Estas van desde los ~500 m de profundidad hasta los ~3.000 m, siendo las más profundas aquellas de los perfiles D, F y G, los cuales, coincidentemente, son los que están ubicados hacia el lado este de la zona y, por tanto, más cercanos al Valles Marineris.

Otra característica observable son las aparentes fallas normales que componen cada cuenca, donde el bloque colgante correspondería a la ladera sur de cada cuenca. Particularmente, el perfil E-E' muestra lo que podría ser incluso una falla lístrica.

En algunos casos, como en el perfil D-D', se observan morfologías como hemi graben, las cuales, como se definió anteriormente, son formados por fallas normales que, a su vez, suelen formarse en zonas de rifts, dorsales oceánicas y márgenes pasivos (Van der Pluijm y Marshak, 2004).

4.4.3 Fallas y Cuencas

Otra rasgo importante que fue posible reconocer sobre la superficie del Noctis Labyrinthus son ciertas estructuras asociadas a tectonismo. Por ejemplo, se ven fallas de rumbo (Figura 24.a) y además fallas normales que provocan graben (estos últimos en mayor cantidad y extensión) (Figura 24.c). Adicional a las fallas mencionadas, está la existencia de cuencas tipo pull apart (Figura 24.b) y en echelón (Figura 22.d) (Bistacchi et al., 2003).

Todos los casos presentados mencionados se ubican en la zona norte del Noctis Labyrinthus y coincide con que se encuentran en la unidad eHI, la más antigua en edad y, por tanto, la que técnicamente debería verse más afectada por estar más expuesta a fenómenos geológicos, ya sean tectónicos o de impacto de asteroides.

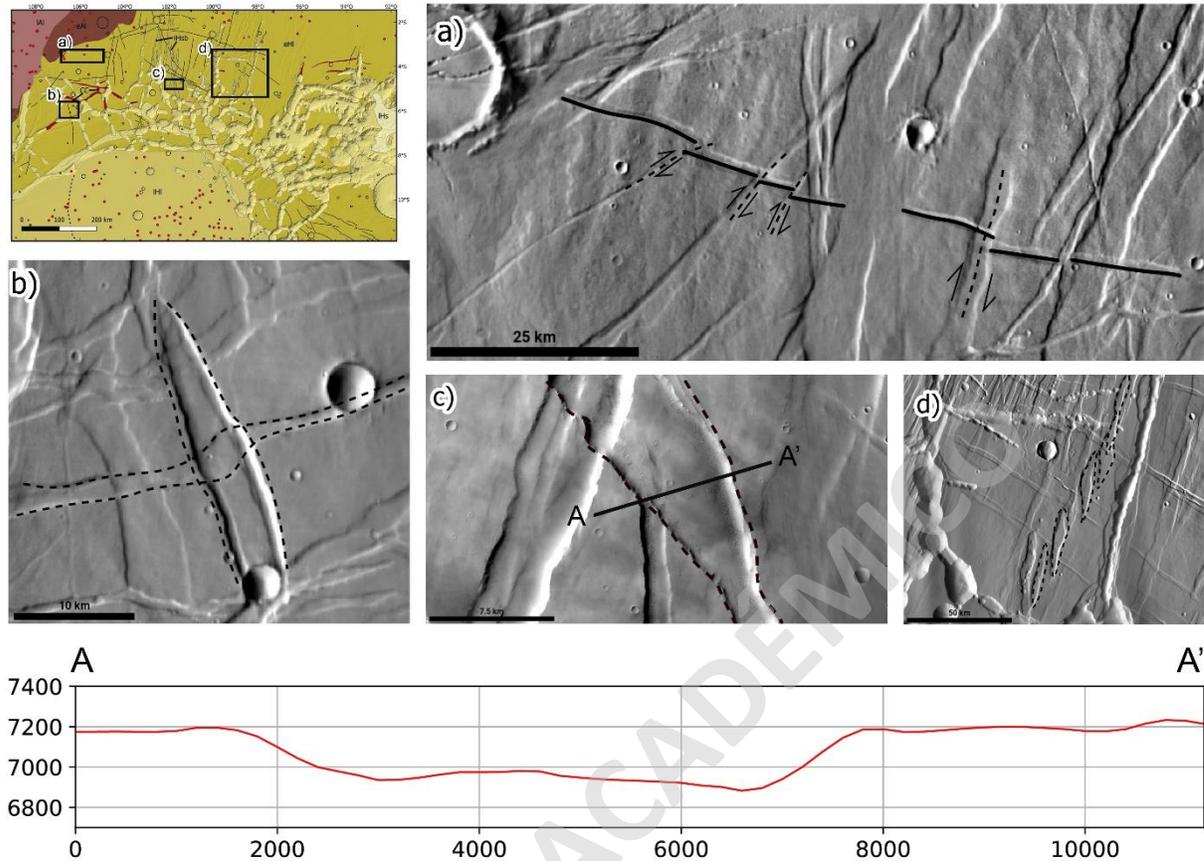


Figura 24: Fallas y cuencas. En orden: a) Fallas de rumbo dextrales en dirección NNE-SSW a NE-SW en el extremo NW de la zona de estudio; b) Cuenca pull-apart ubicada en la zona centro hacia el Oeste; c) En negro límites de graben. Aproximadamente al centro de la zona de estudio; d) Cuencas en echelón, ubicadas al NE de la zona de estudio.

Además, se observaron al menos dos direcciones preferentes de las fallas, NNE-SSW y NW-SE. Estas dos direcciones coinciden con las que se obtuvieron en el análisis de lineamientos previo. De esta manera es que se reafirma ciertas direcciones preferentes de cinemáticas antiguas.

Por otro lado, tanto fallas como cuencas demuestran cierta temporalidad y direcciones de desplazamiento. De acuerdo con las direcciones de desplazamiento, no pareciera haber una tendencia marcada entre los distintos sets de lineamientos (Grupos 1, 2 y 3) que engloban a las fallas y cuencas, por lo que se pueden observar movimientos sinestrales y dextrales por igual.

Con respecto a las temporalidades, se hizo una inspección detallada de relaciones de corte en zonas que mostraran estructuras con cinemáticas importantes, lo cual se retomará más adelante en el estudio en un análisis de paleo-deformación en el apartado 4.4.4.

Finalmente, las fallas de rumbo observadas presentan cierta fuerza tensional que termina ayudando a que las mismas fallas se ensanchen al punto de generar graben. Sin embargo, esta fuerza tensional no sería tan importante como las observadas en las cuencas pull-apart y en echelón.

4.4.4 Análisis de paleo-deformación

En esta sección se presentan una serie de perfiles construidos en los diferentes dominios estructurales (Figuras 25, 26, 27 y 28). Estos dominios estructurales involucran a las unidades eHl (presente en las cuatro figuras mencionadas), lHsb (Figura 27) y lHb (Figura 28).

El primer dominio estructural (Figura 25) está conformado solo por la unidad definida como eHl y se ubica en el NW de la zona de estudio. Aquí se observan fallas de rumbo sinestrales en dirección NNE-SSW en su mayoría. Estas deforman un lineamiento marcado en naranja que es casi W-E. Una particularidad de estas fallas de rumbo son las grandes estructuras extensionales tipo graben o cuenca que generan, llegando incluso a los ~7.5km de anchura, lo que indicaría que no son simples fallas de rumbo, sino que fallas transtensionales.

Analizando los movimientos verticales y horizontales de esta zona, se observa que las fallas realizan movimientos horizontales sobre el lineamiento “naranja” del orden de hasta ~5.5km, mientras que los movimientos verticales, dígase la profundidad de los graben generados por las fallas, no supera los ~200m.

Con los valores de anchura, profundidad y además del movimiento de los lineamientos, se podría decir que, al menos en este primer dominio estructural, los movimientos considerados como horizontales son mayores que los movimientos verticales.

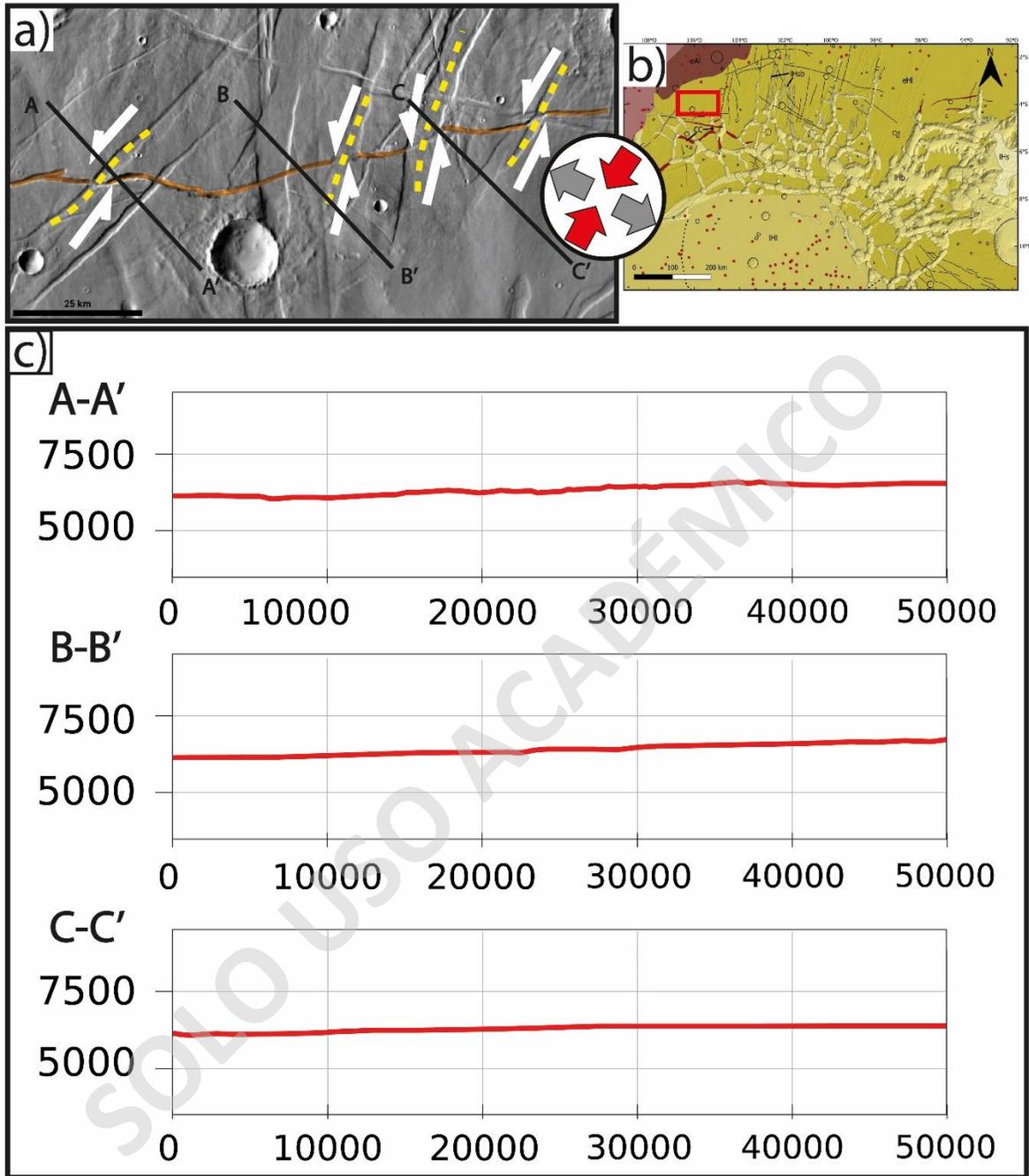


Figura 25: Primer dominio estructural. En orden: a) Lineamiento (en naranja) cortado por fallas de rumbo (en amarillo y punteado) y trazado de perfiles sobre lo anterior (en negro); b) Mapa de ubicación. Recuadro rojo representa la ubicación de a); c) Perfiles.

Analizando el dominio estructural B (Figura 26), ubicado en el centro norte de la zona de estudio, se obtuvieron datos medianamente similares a los del primer dominio. Por ejemplo, ambos análisis son netamente sobre la unidad eHI. Aquí se analizan lineamientos irregulares, probablemente

graben o cuencas, los cuales son “cortados” por fallas que parecieran ser fallas de rumbo sinestrales en dirección NNE-SSW a N-S. Las cuencas en cambio tienen un rumbo NNE-SSW.

Estas fallas, al cortar las cuencas del sector tienden a generar pequeñas cuencas con formas sigmoidales, lo cual podría corresponder a cuencas tipo pull-apart. Cabe decir que las cuencas en este sector en general van desde los ~70 hasta los ~230m de profundidad, siendo estas últimas visibles en el perfil C-C' de la Figura 25. Con respecto a su ancho, estas varían entre los ~1.7 a los ~3.8km. Las fallas tienden a generar un desplazamiento de entre ~1 a ~2.5km.

A pesar de que los desplazamientos provocados por las fallas y la extensión de las cuencas a su alrededor sean de menor magnitud que en dominio anterior (Figura 25), queda una vez más en evidencia que los movimientos horizontales son claramente más importantes que los verticales. Una similitud más que tienen estos dos dominios estructurales es que, en ambos casos, las cuencas no tienen una profundidad máxima que supere los ~200 a ~230m.

En lo que respecta al dominio estructural C (Figura 27), este se caracteriza por estar compuesto tanto por la unidad eHI como por la unidad IHsb y se ubica prácticamente en el centro de la zona de estudio. Lo más destacable de esta zona es que un set de fallas, aparentemente de rumbo dextrales, cortan a la unidad IHsb, marcada en naranja en la Figura 27 en dirección NW-SE. Las cuencas correspondientes a la unidad IHsb tienen un rumbo N-S a NNW-SSE.

Al hacer un breve análisis centrado en la unidad IHsb, se obtuvo que la profundidad de estas cuencas superficiales es cercana a los ~350m, superando al general de las cuencas de la unidad eHI que no sobrepasan los ~230m. Adicional a eso, el ancho de las cuencas de la unidad IHsb puede llegar a rondar los ~7km. Finalmente, el desplazamiento provocado por las fallas llega incluso a los ~4km. Con lo anterior, nuevamente se deja en evidencia la gran magnitud de los desplazamientos horizontales por sobre los verticales.

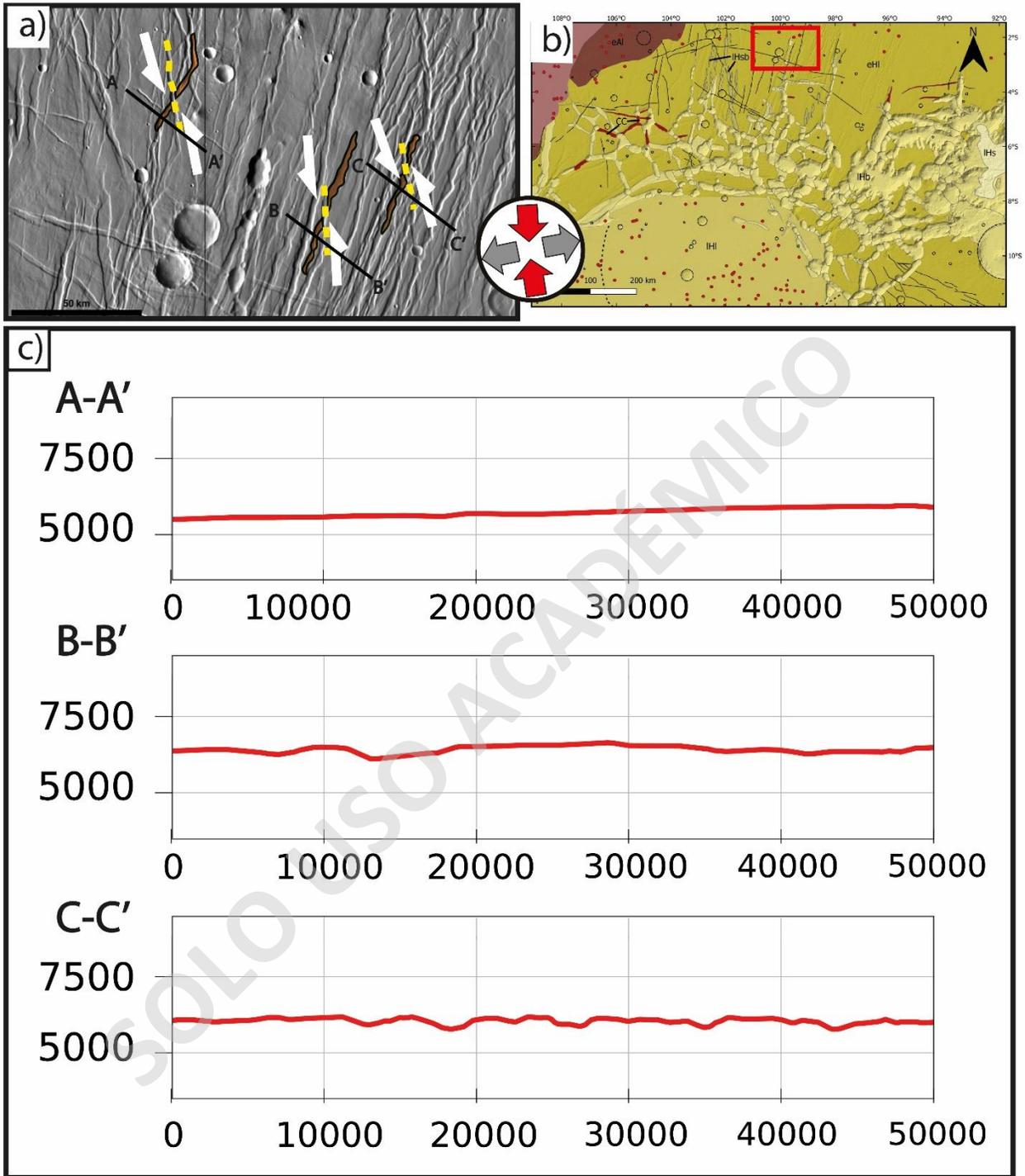


Figura 26: Segundo dominio estructural. En orden: a) Lineamientos NNE-SSW (en naranja) cortados por fallas de rumbo N-S a NNW-SSE (en amarillo punteado) y trazados de perfiles (en negro); b) Mapa de ubicación. Recuadro rojo indica ubicación de a); c) Perfiles.

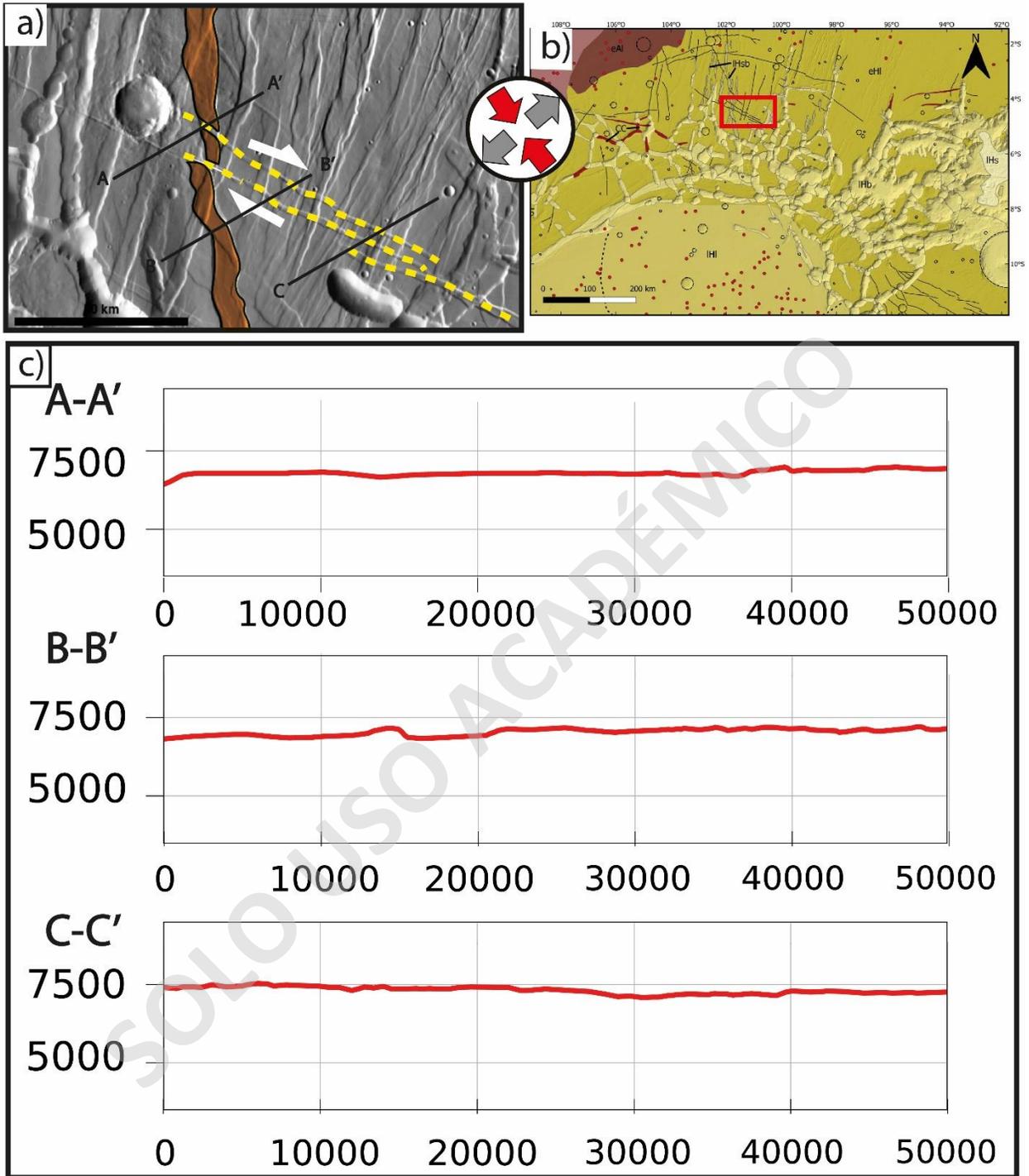


Figura 27: Tercer dominio estructural. En orden: a) Lineamiento N-S (en naranja) cortado por fallas de rumbo NW-SE (en amarillo punteado) y trazados de perfiles (en negro); b) Mapa de ubicación. Recuadro rojo indica ubicación de a); c) Perfiles.

El último de los dominios estructurales (Figura 28) es el más diferente de todos debido a las estructuras que posee, pues parecieran estar a una escala muy distinta. Este dominio involucra a la unidad eHl, IHb y parte de IHsb (marcada en naranja) y se encuentra en el centro de la zona de estudio, algo más al sur del dominio estructural C.

Aquí se encuentran fallas de rumbo sinestrales en dirección NW-SE que provocan cierto desplazamiento de algunos lineamientos de entre ~2 a ~4km, siendo el mayor correspondiente al desplazamiento de la unidad IHsb.

Una característica que destaca por sobre las demás es la profundidad de las cuencas pertenecientes a la unidad IHb, las cuales llegan a superar los ~2km (rozando incluso los ~2.5km) de profundidad como se observa en los perfiles A-A' y C-C' de la Figura 28. Es entonces que, al menos en el dominio estructural D, los movimientos horizontales y verticales son de escalas más similares, o al menos no tienen una diferencia tan marcada como sucede en los otros dominios.

Si bien es difícil darles una orientación a todas las cuencas de la unidad IHb debido a la forma radial que posee en su totalidad, sí se puede observar, al menos en la zona enmarcada por la Figura 28, una cierta tendencia en dirección NW-SE, aunque también se observa otra con rumbo NNE-SSW.

Algo observado particularmente dentro de estas grandes cuencas, es la existencia de estructuras que se asemejan a los hemi-graben. Se puede observar al menos uno en el perfil C-C', con profundidades superiores a los 1.000 m y ancho de ~4.000 m. Si bien al observar la estructura pareciera ser un hemi-graben, lo cierto es que sus proporciones podrían ser indicativo de morfologías de mayor envergadura, como un rift (Banerdt et al., 1992). Teniendo entonces estas proporciones, es esperable que la estructura esté relacionada a fallas normales de ángulo relativamente alto que cortan a través de la corteza frágil (Schultz, 1991, 1995; Mege y Masson, 1996b; Anderson y Grimm, 1998; Hauber y Kronberg, 2005). Aun así, debe destacarse la presencia también de graben de decenas a cientos de metros de profundidad en el Noctis Labyrinthus como

ya se ha mostrado anteriormente (Figura 21) y de manera similar a Peulvast et al. (1999) en el Valles Marineris.

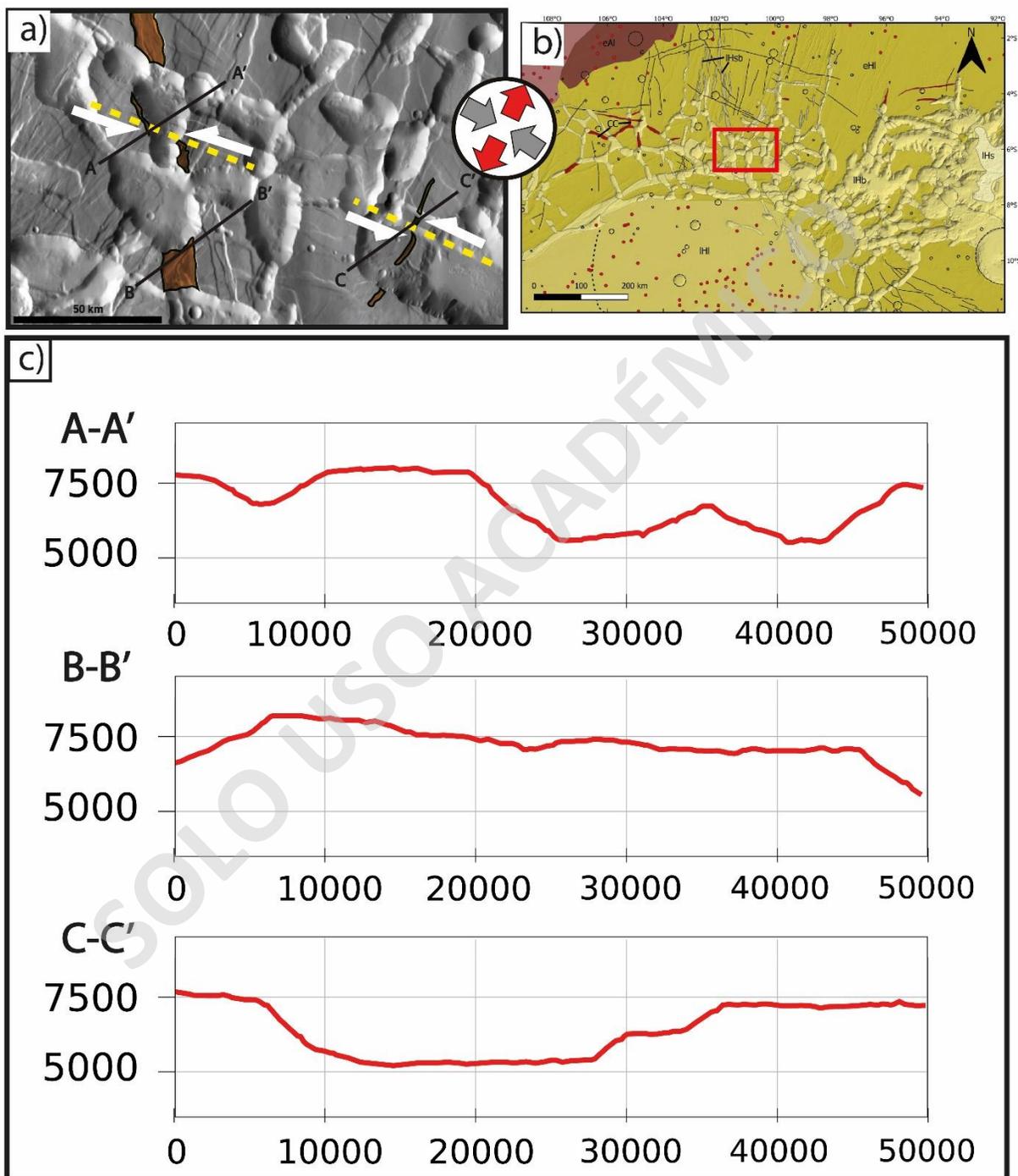


Figura 28: Cuarto dominio estructural. En orden: a) Lineamiento N-S a NNW-SSE (en naranja) cortado por fallas de rumbo NW-SE (en amarillo punteado) y trazado de perfiles; b) Mapa de ubicación. Recuadro rojo indica ubicación de a); c) Perfiles.

Teniendo los cuatro dominios ya definidos, se pueden hacer ciertas correlaciones entre las direcciones de rumbo de las fallas y direcciones de contracción y tensión (Figura 29). Cada falla de rumbo, en conjunto con la estructura extensiva asociada a esta, puede indicar las direcciones de contracción (mayor deformación) y tensión (menor deformación).

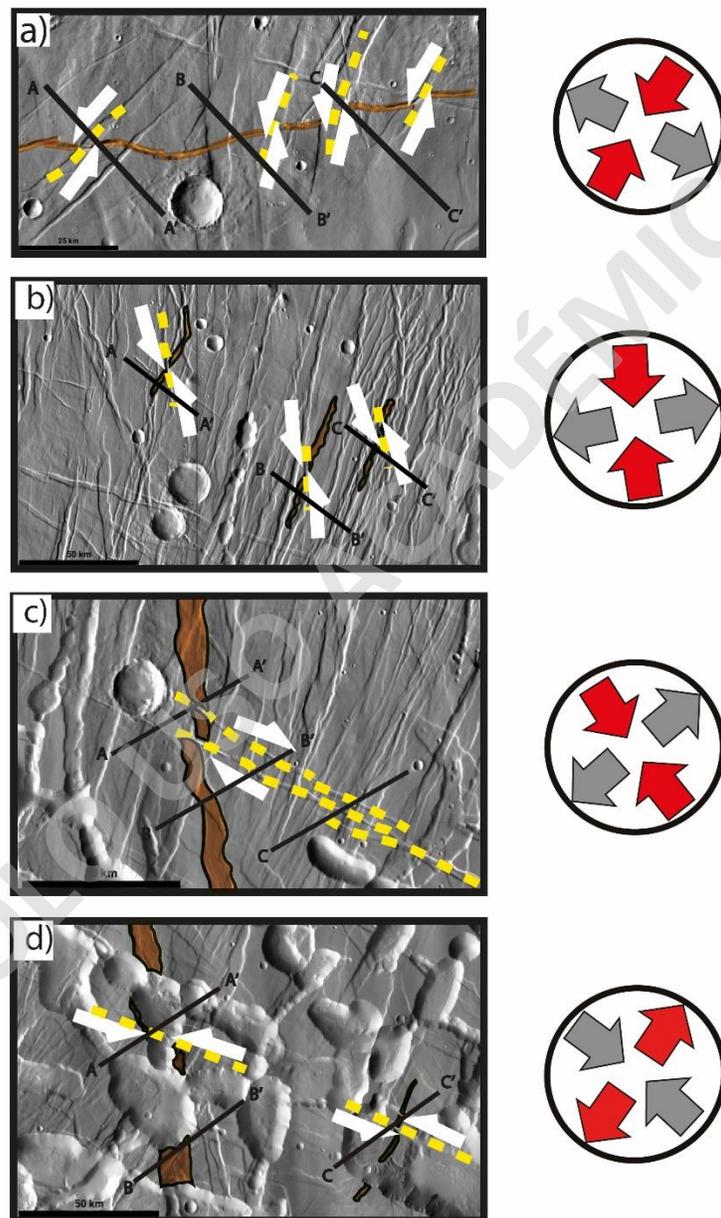


Figura 29: Direcciones de tensión y contracción para cada dominio estructural. Flechas en rojo la dirección de contracción para los primeros tres dominios, mientras que para el último dominio se marca la dirección de tensión.

Para el caso del primer dominio estructural, habría una dirección de contracción NNE-SSW y una de tensión en dirección NW-SE. Para el segundo dominio, la dirección de contracción sería NNW-SSE, mientras que la de tensión NE-SW, muy cerca de ser W-E. El tercer dominio tendría una deformación mayor en dirección NNW-SSE y una menor deformación en NW-SE. Finalmente, el cuarto dominio tendría unas direcciones de compresión y tensión muy similares al tercer dominio, sin embargo, está la salvedad de que, en este caso, en la dirección de tensión (NNE-SSW), la extensión sería de mayor magnitud que en los dominios anteriores.

Integrando la temporalidad de los rasgos estructurales identificados, junto con las evidencias de temporalidad derivados de la fotointerpretación, se pudo realizar un análisis de temporalidad relativa a los distintos indicadores de paleo deformación obtenidos para cada dominio.

En primer lugar, se tiene el sistema de fallas de rumbo (probablemente transtensionales) de orientación NNE-SSW expuestas en el dominio estructural A (Figura 25) y que marcarían una primera paleo-deformación preponderante en el mismo rumbo que las fallas. Luego, en el dominio estructural B (Figura 26), las fallas de rumbo en dirección N-S a NNW-SSW cortan lineamientos con rumbo NNE-SSW (mismo rumbo generado en el primer dominio estructural).

Luego, el dominio estructural C (Figura 27) estaría sobrepuesto al B, pues las fallas de rumbo en dirección NW-SE cortan lineamientos (en este caso la unidad IHsb) que tienen un rumbo muy similar al documentado en el dominio estructural B, el cual es N-S a NNW-SSE.

Finalmente, el dominio estructural D contiene tres direcciones importantes: la primera siendo las fallas de rumbo en dirección NW-SE, rumbo que también tienen las fallas del dominio C. Superpuesto a esto, están las cuencas más grandes y profundas, que se extienden principalmente dirección NNE-SSW y en menor medida en NW-SE.

Lo anterior se puede resumir en 4 grandes etapas (Figura 30): Etapa I, correspondiente a la paleo-deformación en dirección NNW-SSE; Etapa II, con las cinemáticas en dirección N-S a NNW-SSE; Etapa III, con direcciones en NW-SE y, finalmente, Etapa IV, con cinemáticas en direcciones NNE-

SSW y NW-SE. Cabe decir que esta última etapa, debido a la magnitud de las cuencas generadas, se considera la de mayor actividad tectónica.

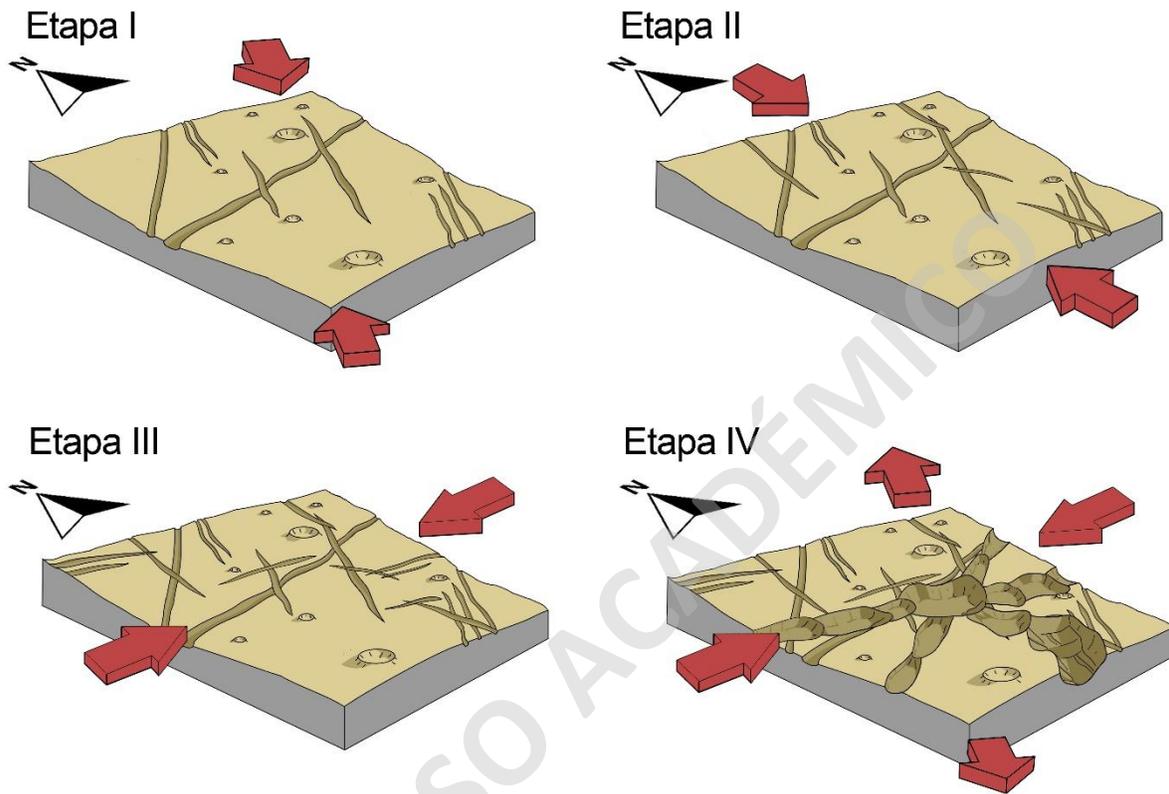


Figura 30: Etapas de las diferentes cinemáticas ocurridas en el Noctis Labyrinthus a lo largo de su evolución.

5 Discusión

5.1 Análisis cinemático y de deformación

Las etapas mencionadas en el apartado anterior con respecto a distintas cinemáticas que ocurrieron en el Noctis Labyrinthus sugieren una historia de origen tectónico, con una morfología controlada principalmente por procesos deformacionales. Esto más que nada reflejado en las cuencas generadas por las distintas cinemáticas o, más bien, por la tensión creada de manera perpendicular a las cinemáticas, o rumbos de falla demostrados anteriormente.

Si bien esta tensión y su consecuente deformación son leves en las primeras tres etapas (las cuencas tienen un ancho que se extiende hasta los ~4km como máximo), esto cambia drásticamente cuando se habla de la cuarta y última etapa. Estas últimas cuencas, pertenecientes a la unidad IHb, pueden llegar a tener anchos de hasta ~30km (coincidentes con la tensión en dirección NNE-SSW) dentro del dominio estructural D e incluso más a medida que se aproximan al Valles Marineris.

Esto entonces, podría ser indicativo de que el Noctis Labyrinthus pasó por distintas etapas deformativas, cada una representada por las cuatro etapas mencionadas antes, en donde la última etapa fue la más tectónicamente intensa. Sin embargo, esta misma última etapa es también, probablemente, la más compleja debido a que no se puede establecer una sola cinemática y tensión sobre toda la unidad IHb al tener una forma casi radial.

Bistacchi et al. (2003) afirma que hubo una extensión en dirección NNE-SSW que no solo se ve en la zona sur del Noctis Labyrinthus, sino que también es el movimiento de extensión que influyó en la formación del Valles Marineris, implicando que ambas estructuras están correlacionadas por un mismo campo de deformación, lo que lleva a que esta sería la misma observada en este estudio en la llamada Etapa IV. Aun así, no hace un análisis de la zona oeste, por lo que tampoco tiene en cuenta el posible cambio de direcciones de tensión que podría producirse ahí.

Otro estudio sobre la posible evolución del Noctis Labyrinthus fue llevado a cabo por Tanaka y Davis (1988), siendo probablemente el estudio con mayor detalle respecto al orden cronológico de distintos sets de fallas. Si bien detalla tanto al Noctis Labyrinthus como al Syria Planum y las áreas proximales, hay bastantes similitudes con el presente estudio.

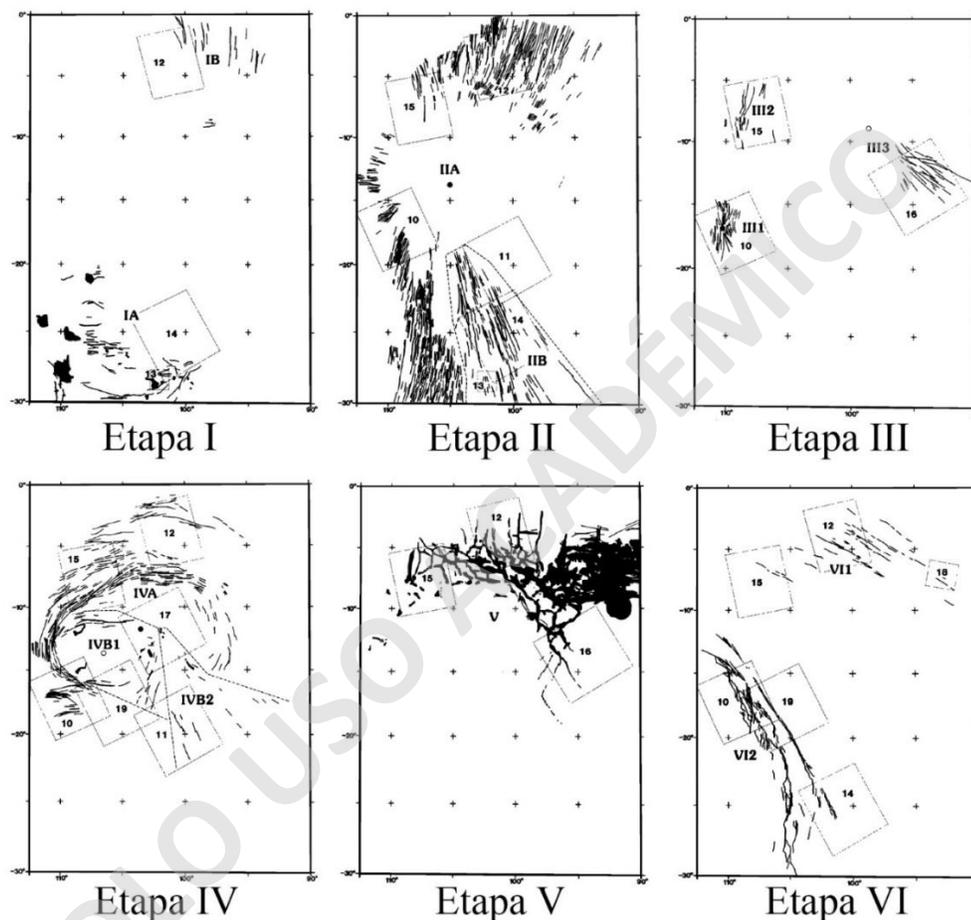


Figura 31: Secuencia de características de la zona de Noctis Labyrinthus, Noctis Fossae y Syria Planum. Extraído de Tanaka (1988).

Tanaka y Davis (1988) proponen seis etapas para la evolución (Figura 31), las que pueden ser comparables con las propuestas de este trabajo al ubicar lineamientos observados en los dominios estructurales en las etapas de Tanaka y Davis (1988), aunque con una clara diferencia en el orden cronológico propuesto aquí (Figura 32). Los autores describen como Etapa I a la que aquí se reconoce como Etapa II, mientras que su etapa II estaría presente tanto en las Etapas I y II del presente trabajo. La Etapa III de ellos no es reconocida en este estudio mientras que la IV sería el

símil a la Etapa I de aquí. La etapa VI sería el símil a la Etapa III. Finalmente, la Etapa V de Tanaka y Davis (1988) y Davis (1988) correspondería a la Etapa IV aquí propuesta. Si bien podrían observarse algunas similitudes en la temporalidad aparente entre los sets de fallas propuestos por Tanaka y Davis (1988) y las cinemáticas de este estudio, también quedan claras las diferencias. Aun así, hay que destacar que los sets de fallas y/o lineamientos de ambos estudios no son totalmente iguales, esto porque en el estudio de Tanaka y Davis (1988) se realizó un estudio más regional (incluyendo al Syria Planum y parte de la Claritas Fossae), lo que implica que varios sets de fallas y correspondientes etapas son más importantes fuera del Noctis Labyrinthus, por lo que las diferencias serían entendibles.

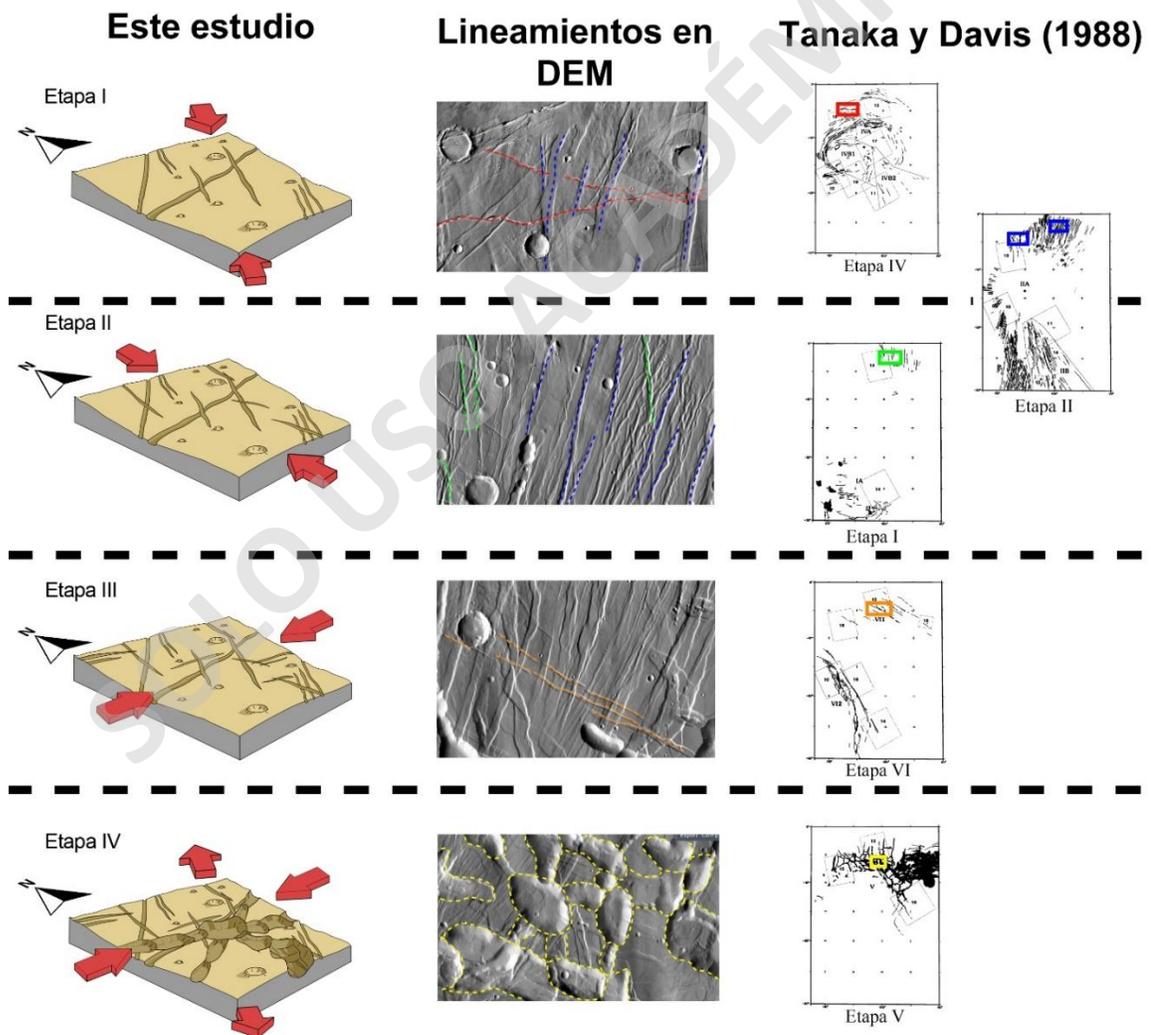


Figura 32: Comparación entre las etapas cinemáticas de este estudio sobre la historia tectónica del Noctis Labyrinthus y las etapas de distintos sets de fallas descritos por Tanaka y Davis (1988).

Retomando el punto que hace Bistacchi et al. (2003) sobre la correlación entre el Valles Marineris y el Noctis Labyrinthus a través del movimiento extensivo en dirección NNE-SSW, también se puede destacar la similitud entre las pendientes de ambas estructuras (Figura 33). Los grados de inclinación de las pendientes son claramente mayores cuando se trata de la estructura principal del Noctis Labyrinthus, sin embargo, también pareciera haber una correlación con que las pendientes de mayor grado de inclinación tienden a concentrarse en el este de la zona de estudio y en el Valles Marineris. A pesar de que esto no es algo conclusivo de por sí, ayuda a apoyar la idea de que el Valles Marineris y el Noctis Labyrinthus están correlacionados en más de alguna manera, en especial en la zona donde confluyen ambos.

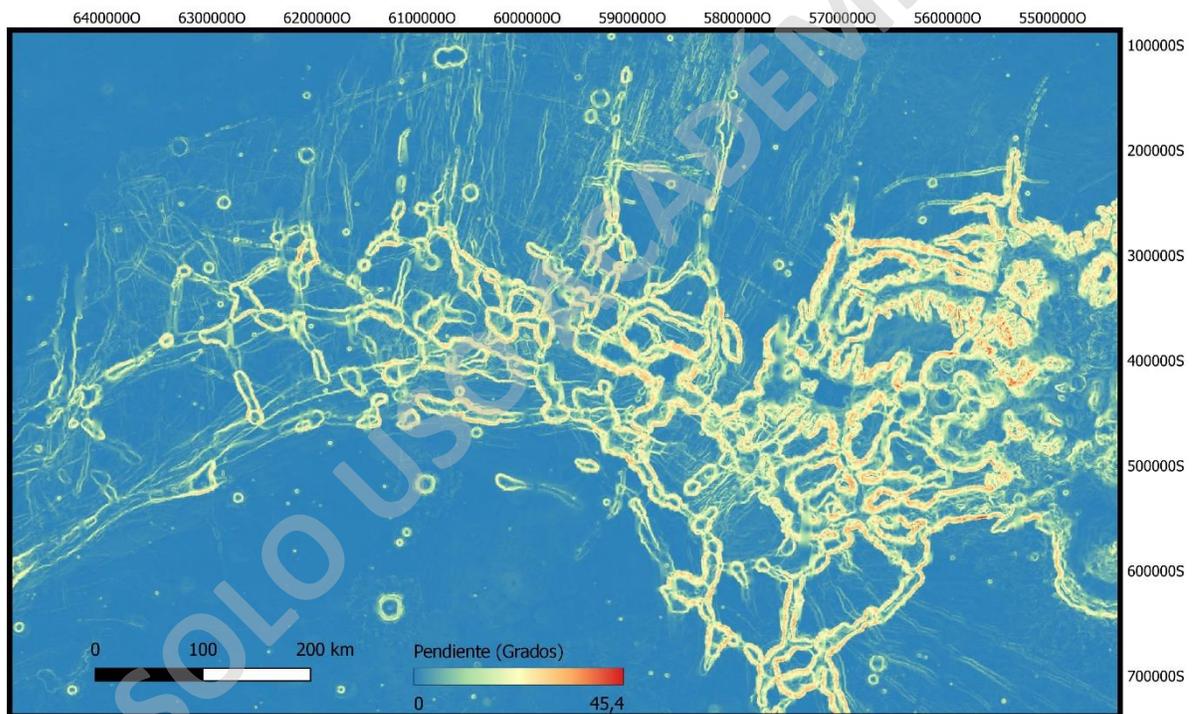


Figura 33: Mapa de pendientes de la zona de estudio. En rojo marca las pendientes más abruptas.

Incluso, asociado también a la dirección de extensión del Valles Marineris propuesta por Bistacchi et al. (2003), se puede tener en cuenta también los estudios sobre “vents” en la región de Tharsis de Richardson et al. (2021) (Figura 34), específicamente sobre los vents del Syria Planum, pues estos tienen una tendencia NW-SE, que es prácticamente perpendicular a la tendencia extensional

principal del Noctis Labyrinthus. Los vientos suelen responder a ciertos controles tectónicos que determinan sus direcciones, además de, por supuesto, responder a la ubicación de los volcanes a los que están asociados (Richardson et al., 2021). Al ser perpendiculares a la dirección de extensión, se puede decir que estos fueron influenciados por esta cinemática y que por ello tienden a tener esta dirección en particular. Esto hace destacar aún más la extensión principal en dirección NNE-SSW, o al menos una dirección similar en NE-SW.

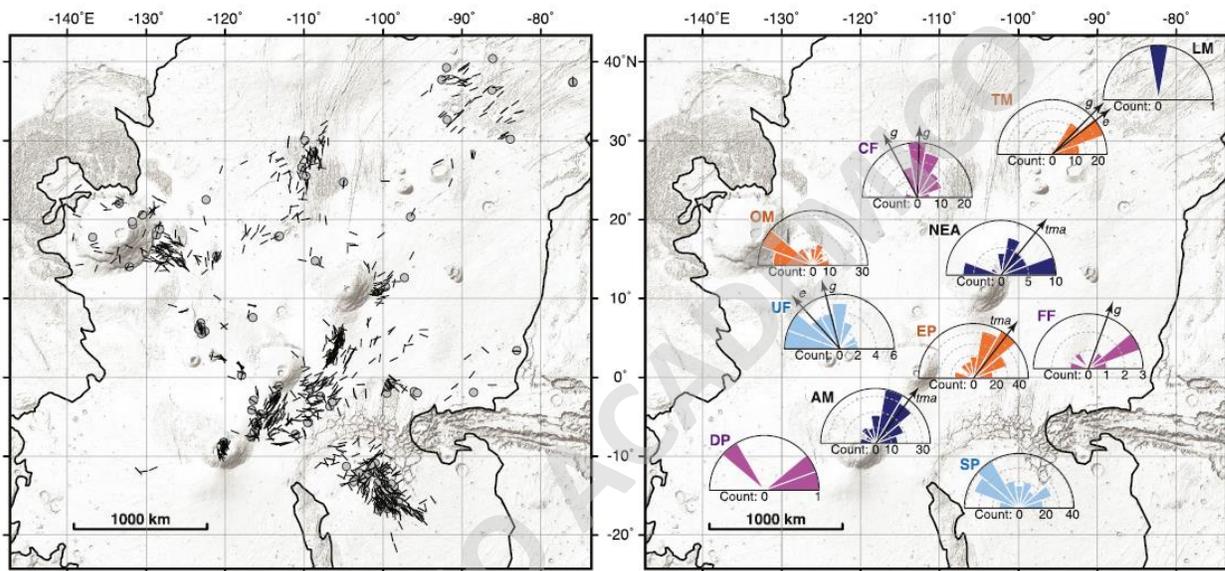


Figura 34: Posiciones y direcciones de vientos en la región de Tharsis. Extraído de Richardson et al (2021).

A una escala más regional, Yin (2012), propone los regímenes tectónicos que estarían modelando la región de Tharsis (Figura 11). Como se mencionó en el apartado 3.2.2, el Noctis Labyrinthus sería una zona de extensión, sin embargo, con una dirección principal opuesta a la propuesta por Bistacchi et al. (2003) y reafirmada por este mismo estudio, que iría de la mano con un movimiento predominante sinistral del Valles Marineris y uno dextral de la zona de fallas Claritas (Figura 35).

Si bien, nuevamente, se toma en cuenta que los movimientos que modelan al Valles Marineris tienen influencia también en el Noctis Labyrinthus, debido a las evidencias anteriores aquí no se considerará esta parte de la propuesta de Yin (2012), sino que se tomará la propuesta de Bistacchi et al. (2003), donde se hace énfasis en la extensión NNE-SSW ya comprobada.

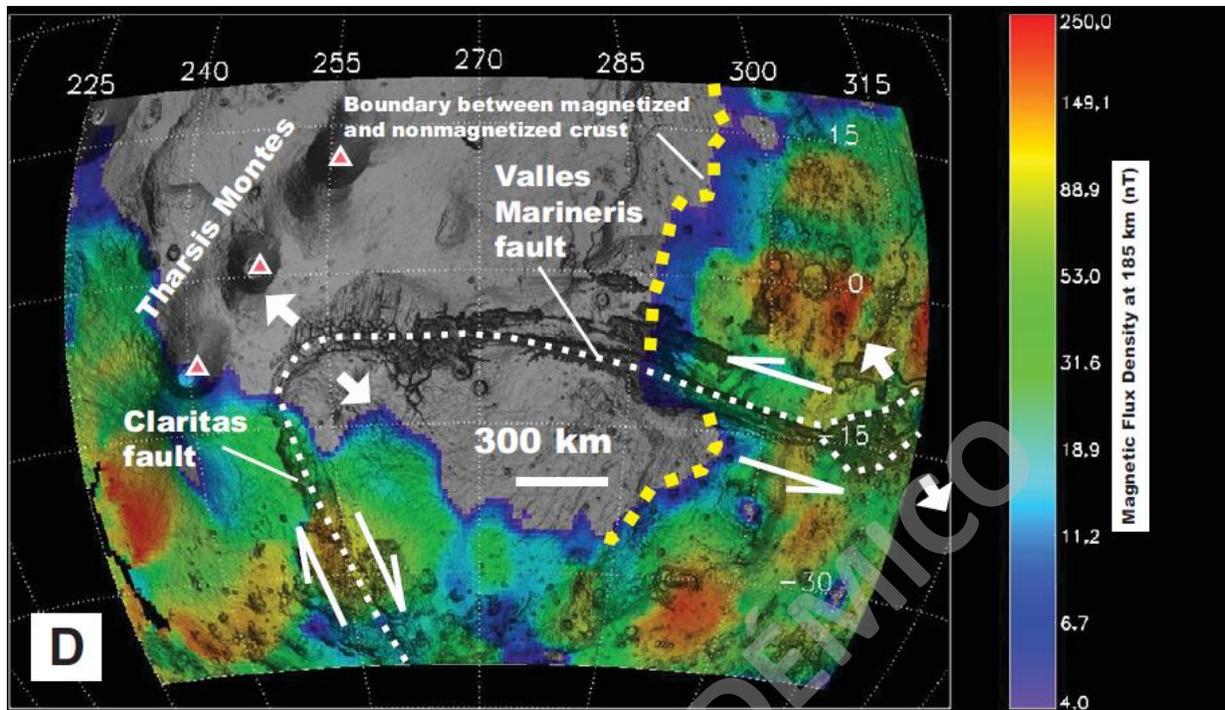


Figura 35: Modelo tectónico del Noctis Labyrinthus y alrededores según Yin (2012). Incluye información sobre la magnetización del área.

5.2 Modelos tectónicos

Si bien la geología del Noctis Labyrinthus puede resultar bastante compleja y única, hay ciertas zonas en la Tierra que podrían considerarse homólogas, o al menos tectónicamente similares. Estas zonas son variadas pero se distinguen por tener al menos dos de las siguientes características: Gran altura, volcanismo, cuencas profundas y/o irregularmente distribuidas y en morfología en planta, planicies pequeñas entre cuencas, planicies de gran extensión y diferente altura a ambos lados de la estructura principal, rasgos descritos en el apartado 2.3.

Quizás uno de los primeros ejemplos que se podrían plantear al pensar un cordón montañoso que pueda alcanzar una gran altura como la tiene el Noctis Labyrinthus (por sobre los 9.000 mts), sería los Himalayas (con su altura máxima de 8.848 mts en el Monte Everest). No solo compartirían la característica de la altura y escala, sino que, además, el hecho de que tengan adyacentes “planicies” como el Syria Planum y la cuenca de Tarim respectivamente (Figura 36). Esto teniendo en consideración que los Himalayas representan la zona de mayores alturas en el geode terrestre, a diferencia de Marte donde la mayor altura es representada por el monte Olimpo.

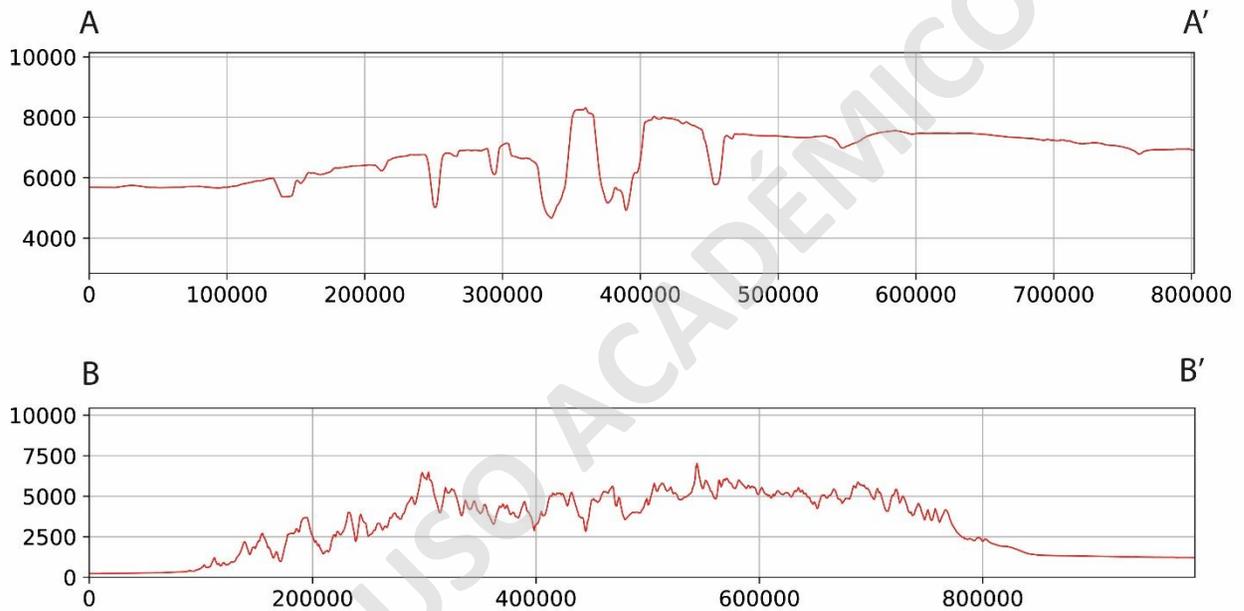
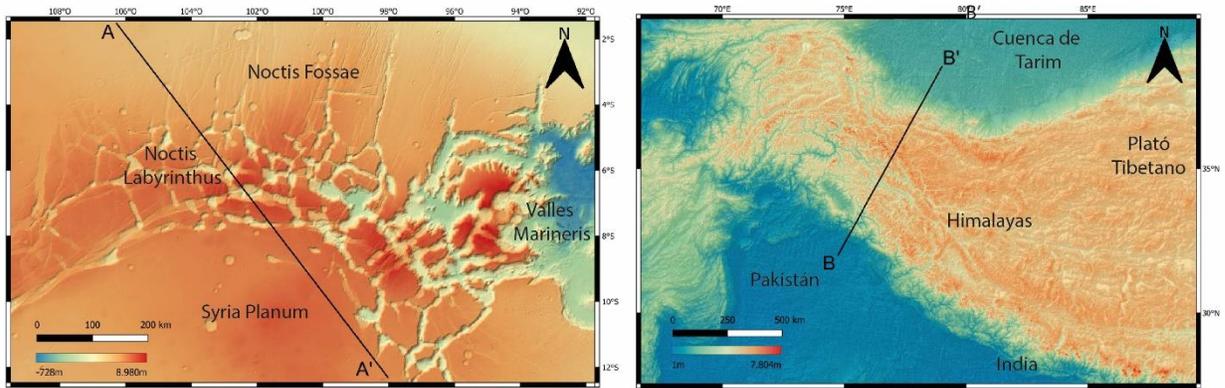


Figura 36: Comparación de geomorfologías similares del Noctis Labyrinthus (a la izquierda) y los Himalayas (a la derecha). Números 1 corresponden a las zonas a comparar, siendo estas el Noctis Labyrinthus con los Himalayas (y parte de la meseta tibetana) y parte del Syria Planum con la Cuenca de Tarim.

Aun así, hay un contraste entre ambos puntos, y es que el Noctis Labyrinthus está ubicado técnicamente en medio de un campo volcánico (aunque no hay volcanes en el mismo Noctis Labyrinthus), mientras que los Himalayas apenas podría considerarse que tiene una cantidad leve de volcanes a su alrededor debido a su ubicación en un margen convergente tipo colisional. Esto último implicaría que, de haber un modelo tectónico similar a alguno en la Tierra, si bien podría corresponder a un posible margen convergente debido a la altura alcanzada, este no podría ser como el que ocurre en los Himalayas, por la falta de volcanismo tanto en el orógeno como en las planicies

a su alrededor (con un par de excepciones a este último), debido al engrosamiento de la corteza que ocurre en este caso.

Además de lo anterior comparte similitud con sus cuencas, pues estas son tan profundas que en algunos casos llegan a superar los 2.000 metros de profundidad (Figura 36); característica que suele ser más frecuente en el Noctis Labyrinthus. Sumado a esto, las cuencas parecieran ser irregulares en su forma, sin embargo, parecieran tener cierta regularidad en su disposición, dándoles cierta frecuencia.

Otro ejemplo de similares rasgos es el Rift de África, específicamente desde el Golfo de Adén hasta la rama occidental del rift, o Rift Albertino, zonas consideradas extensionales. Al observar ambas zonas, el Golfo de Adén sería el símil al Valles Marineris, mientras que el Rift Albertino sería el Noctis Labyrinthus debido a su forma curvada (Figura 37).

Aquí se destaca la cadena montañosa situada en el Rift Albertino que, si bien no es de gran altura, tiene las características principales del Noctis Labyrinthus, que son altos topográficos que delimitan un sistema de cuencas (o conforman los límites de un sistema de cuencas), las que corresponderían a los lagos ubicados en el rift. Estas cuencas, si bien no cuentan con las grandes profundidades del Noctis Labyrinthus, podrían considerarse “profundas” (~500m) dentro de la escala del rift (que abarca altura menores a los 1.500m, siendo bastante alejado de los 9km de alto de los perfiles del Noctis Labyrinthus), además de ser irregulares tanto en forma como en su disposición.

Además, el volcanismo en la zona es fuerte gracias al mismo sistema de rifts que permite el fácil ascenso del magma, aunque estaría el dilema con el Cratón de Tanzania que no permite volcanismo como si lo hace el Syria Planum, que sería su símil en este modelo. También se da la existencia de una planicie adyacente y en altura, que sería también el Cratón de Tanzania. Otro posible dilema con este modelo es el mismo cratón, pues sería este el que estaría dando la forma curvada al Rift de África por ambos lados, cosa que no podría ser el caso del Noctis Labyrinthus por el ya mencionado dilema con el volcanismo. Sin embargo, podría ser indicio de que una morfología

singular en el Syria Planum podría estar generando esa forma curvada o radial del Noctis Labyrinthus.

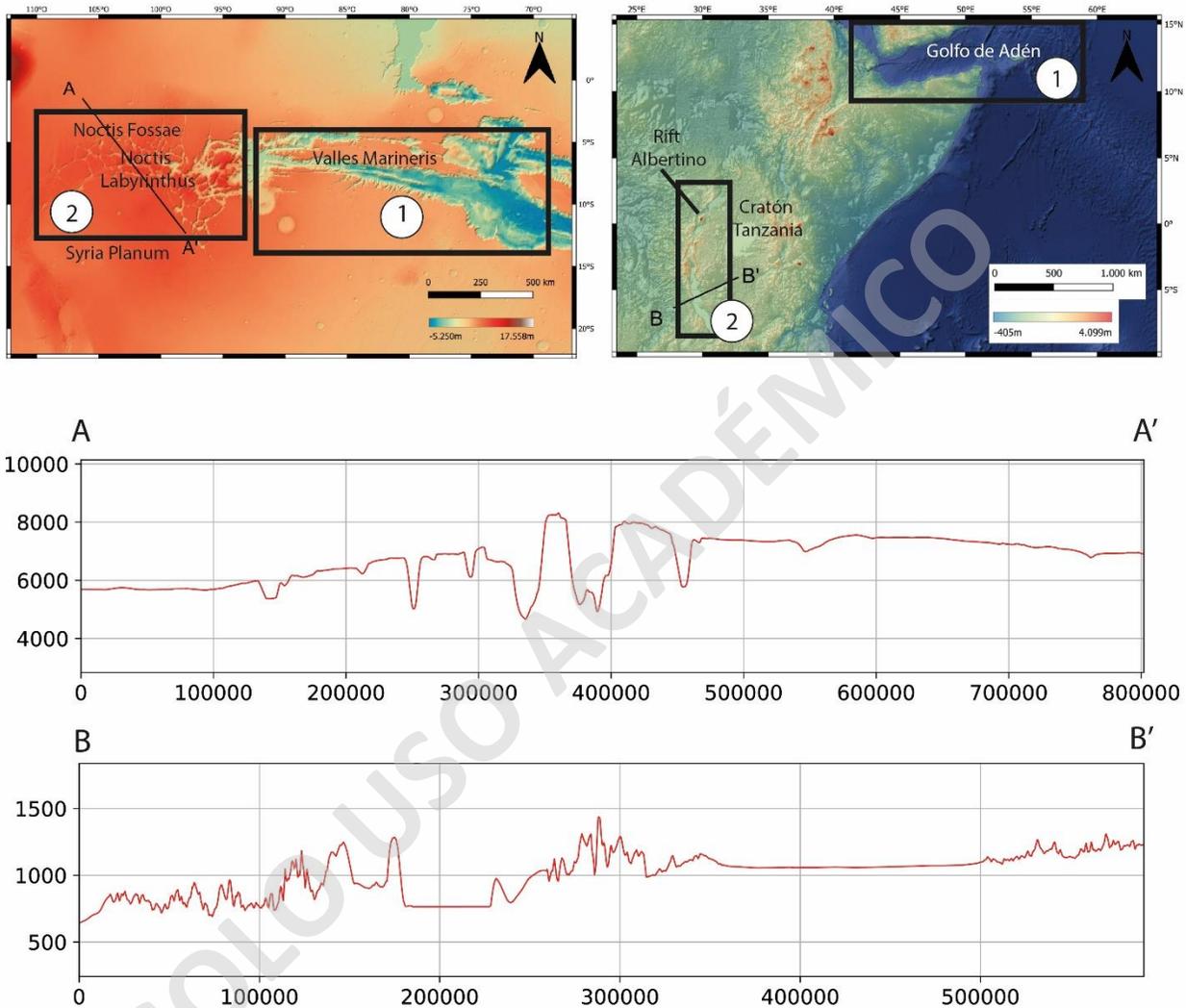


Figura 37: Comparación de geomorfologías similares entre el Noctis Labyrinthus (a la izquierda) y el Rift de África (a la derecha). Números 1 corresponden a la comparación entre el Valles Marineris y el Golfo de Adén; números 2 corresponden a la comparación entre el Noctis Labyrinthus y el Rift Albertino. Adyacentes a estos últimos, están el Syria Planum y el Cratón de Tanzania.

Enfocando la discusión solo en las cuencas de la zona de estudio, podrían plantearse otros posibles modelos, como es el caso del Basin and Range de EE. UU. (Figura 38), conocido por ser una zona de extensión tectónica (Parsons, 2006).

En este se observa una frecuencia constante en cuanto a la ubicación de las cuencas, lo que le da cierto ritmo que puede apreciarse más fácilmente en el perfil (Figura 38). Estas, además, parecieran ser regulares en forma y medianamente profundas, sobrepasando los 1.000 metros en algunos casos. Sin embargo, este tipo de zona carece de las grandes planicies a cada extremo, aunque cuenta con algunas pequeñas planicies entre sus cuencas. Cabe decir que su altura máxima promedio no llega ni a la mitad de la del Noctis Labyrinthus (ronda los 3.000 metros), aunque tampoco es una altura para nada despreciable cuando se compara con otros lugares de la Tierra.

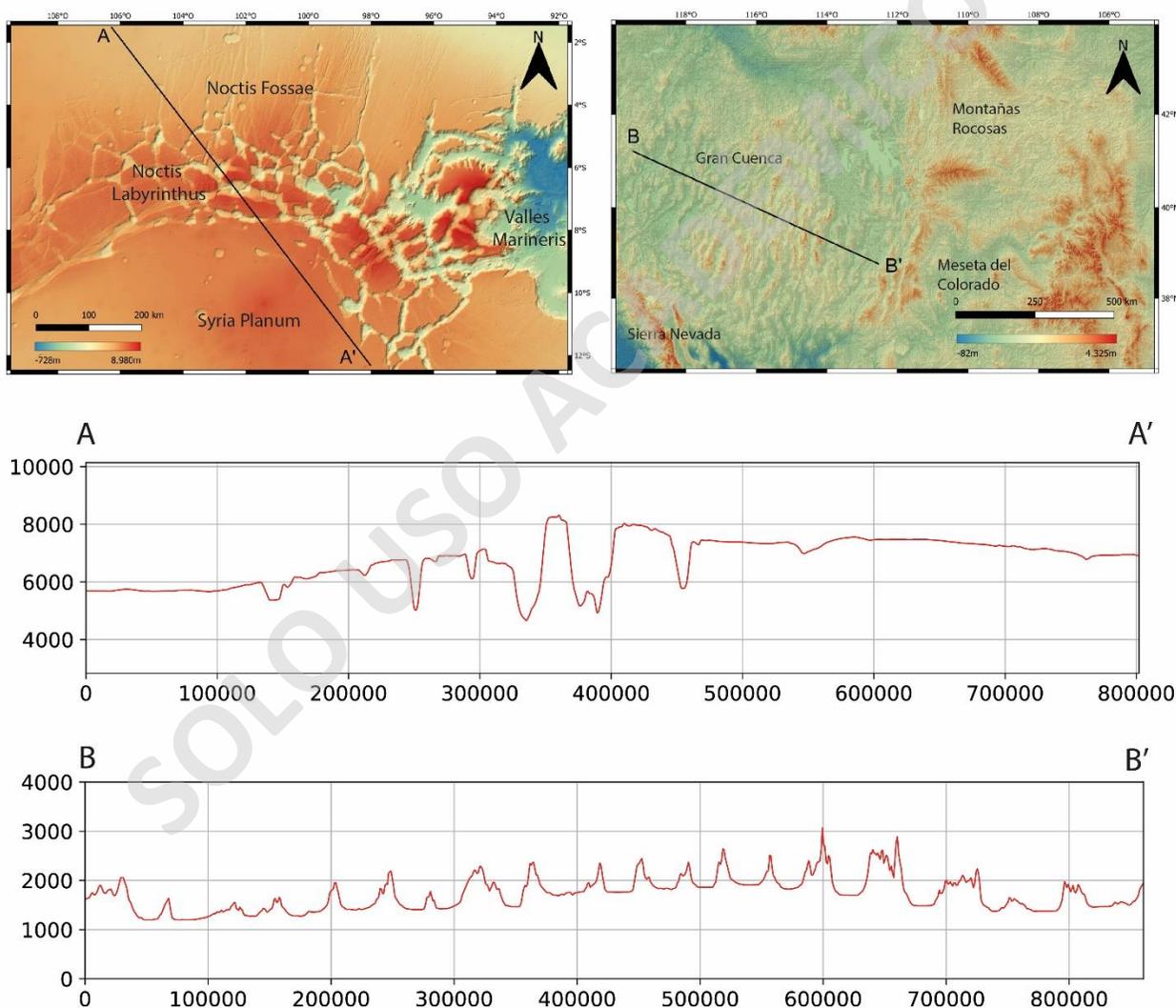


Figura 38: Comparación de geomorfologías más específicas entre el Noctis Labyrinthus y el Basin and Range en Estados Unidos. En este caso se hace enfoque en el tipo de cuencas.

Por otro lado, el volcanismo en la zona este de EE. UU. es fuerte debido a los límites de placa que se hayan cercanos a la costa y al volcanismo intra-placa que se ve mayormente reflejado en Yellowstone (Brandmeier, 2014). Sin embargo, se debe dejar claro que, precisamente en la zona por donde pasa el perfil B-B' el volcanismo es más débil que en todo a su alrededor (Brandmeier, 2014). Esta última característica demostraría un comportamiento relativamente similar al Noctis Labyrinthus, que no posee volcanismo en sí mismo, pero si a sus alrededores.

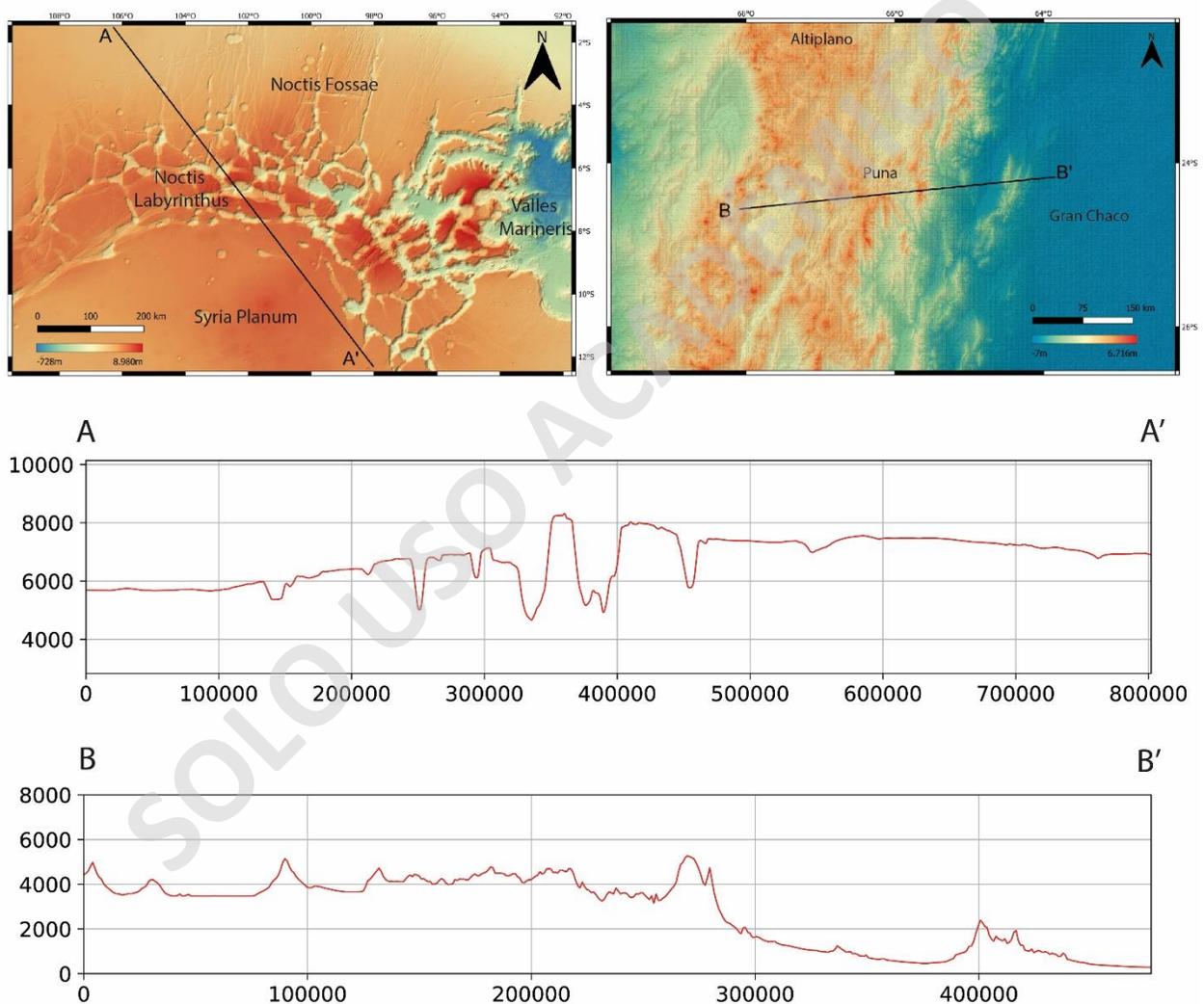


Figura 39: Comparación de geomorfologías más específicas entre el Noctis Labyrinthus y la Puna en el norte de Chile. En este caso se hace enfoque en el tipo de cuencas.

Otro posible modelo asociado teniendo en cuenta más que nada a las cuencas podría ser el caso de la Puna (Figura 39), partiendo por la gran altura de la zona, explicada a partir de procesos tectónicos de engrosamiento cortical y alzamiento topográfico inducido por procesos litosféricos (Kay et al., 1994, Allmendinger et al., 2007, entre otros). Si bien quizás en extensión su escala es claramente menor, no deja de tener varios puntos a favor. Varias cuencas tienen una profundidad promedio de 1.000 metros y son irregulares tanto en forma como en disposición. Sumado a esto, existe una planicie en altura en el lado argentino y, además, hay un claro volcanismo que está asociado a la subducción de la placa de Nazca con la placa Sudamericana y la consecuente cordillera de Los Andes.

Tabla 2: Tabla comparativa de posibles modelos tectónicos similares al Noctis Labyrinthus. Se presenta en mayor tamaño en Anexo 1.

Ambiente tectónico	Altura	Morfologías volcánicas	Estructuras predominantes	Cuencas profundas (profundidad del depocentro)	Cuencas irregulares (morfología)	Frecuencia de las cuencas	Planicies entre cuencas	Planicies (cuencas) a cada extremo
Himalayas	Alta: Hasta ~7.500 m en el perfil; 8.849 m en su cota más alta	Casi nulo	Compresivas	Profundas, algunas de alrededor de ~2.000 m	Sí	Alta regular y	Sí, pequeñas	Sí, ~1.000 m de diferencia entre ambas aprox. Cuenca de retroarco y de antearco correspondientes.
Meseta de la Puna	Medio alta: Hasta ~4.500 m en el perfil	Sí, asociado a Los Andes	Compresivas	Medianas, algunas de alrededor de ~1.000 m	Sí	Alta irregular e	Casi nulas, pequeñas e irregulares	Sí, ~300 m de diferencia entre ambas aprox. Cuenca de trasarco y antearco correspondientes.
Rift de África	Baja: Hasta ~1.450 m en el perfil	Sí, asociado al mismo sistema de rift	Extensivas	No profundas, algunas de alrededor de ~500 m	Sí	Alta irregular e	No	Sí, ~500 m de diferencia entre ambas aprox. Producto de extensión tectónica -> graben.
Basin and Range	Media: Hasta ~3.000 m en el perfil	Sí, asociado a los límites de la placa norteamericana y a vulcanismo intra-placa	Extensivas	Medianas, algunas de alrededor de ~1.300 m	No	Alta y muy regular	Sí, irregulares	No.

También se debe tener en cuenta las posibles similitudes con el modelo propuesto por Yin (2012) sobre la región de Tharsis, puesto que la idea de una zona de subducción no pareciera estar alejada de la realidad teniendo en consideración la clara alineación de los Montes de Tharsis, por ejemplo. Sin embargo, la idea no pareciera conversar con los modelos de los Himalayas y del Rift de África, por lo que habría que tener en consideración que quizás no es solo una simple subducción y que otros factores influyeron y hacen que tenga similitudes a todos los modelos, o simplemente descartar uno o ambos modelos como posibilidades.

Haciendo un resumen (Tabla 2), se podrían destacar dos posibles modelos por sobre los demás, siendo el Rift de África (en primer lugar) y el de la Puna (en segundo lugar), por la cantidad de similitudes geomorfológicas con el Noctis Labyrinthus y las pocas diferencias con este. Si bien resulta que en ambos casos las escalas son menores a las del Noctis Labyrinthus, es también casi la única diferencia real.

5.3 Modelos tectónicos propuestos

5.3.1 Modelos regionales anteriores

Habiendo ya analizado los modelos tectónicos que podrían asimilarse al Noctis Labyrinthus, ahora se debe poner en contexto teniendo en cuenta un área de mayor extensión. Los dominios regionales considerados para realizar dicha contextualización corresponden al Valles Marineris, los Montes de Tharsis y la meseta de Thaumasia.

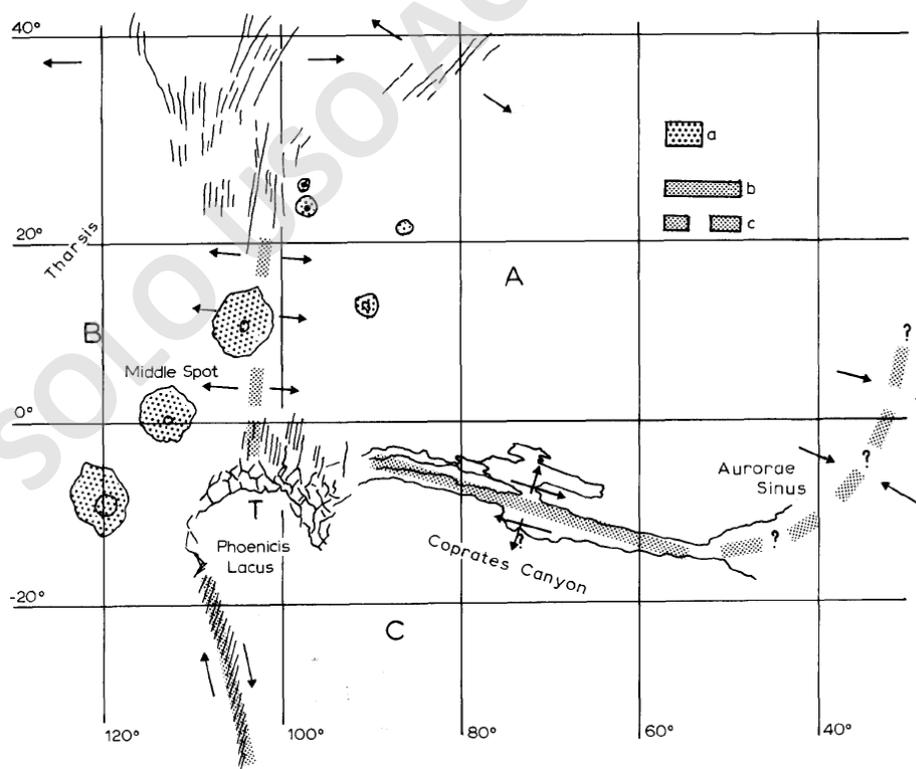


Figura 40: Diagrama esquemático y estructural de parte de la región de Tharsis. Hay que considerar que el Noctis Labyrinthus es nombrado como Phoenicis Lacus y el Valles Marineris como Coprates Canyon. Extraído de Courtillot et al. (1975).

Una de las primeras propuestas tectónicas regionales de la zona fue publicada por Courtillot (1975) (Figura 40), quien propone que tanto Claritas Fossae como el Valles Marineris tienen movimientos transcurrentes, además de extensionales para el segundo de ellos. También nombra al Noctis Labyrinthus como una zona de triple conjunción, donde convergen no solo los movimientos de la Claritas Fossae y del Valles Marineris, sino que propone que estos mismos corresponden a límites de placas y que, además, habría un tercer supuesto límite de placa, aparentemente divergente, que comenzaría en el Noctis Labyrinthus y pasaría por el Asraeus Montes.

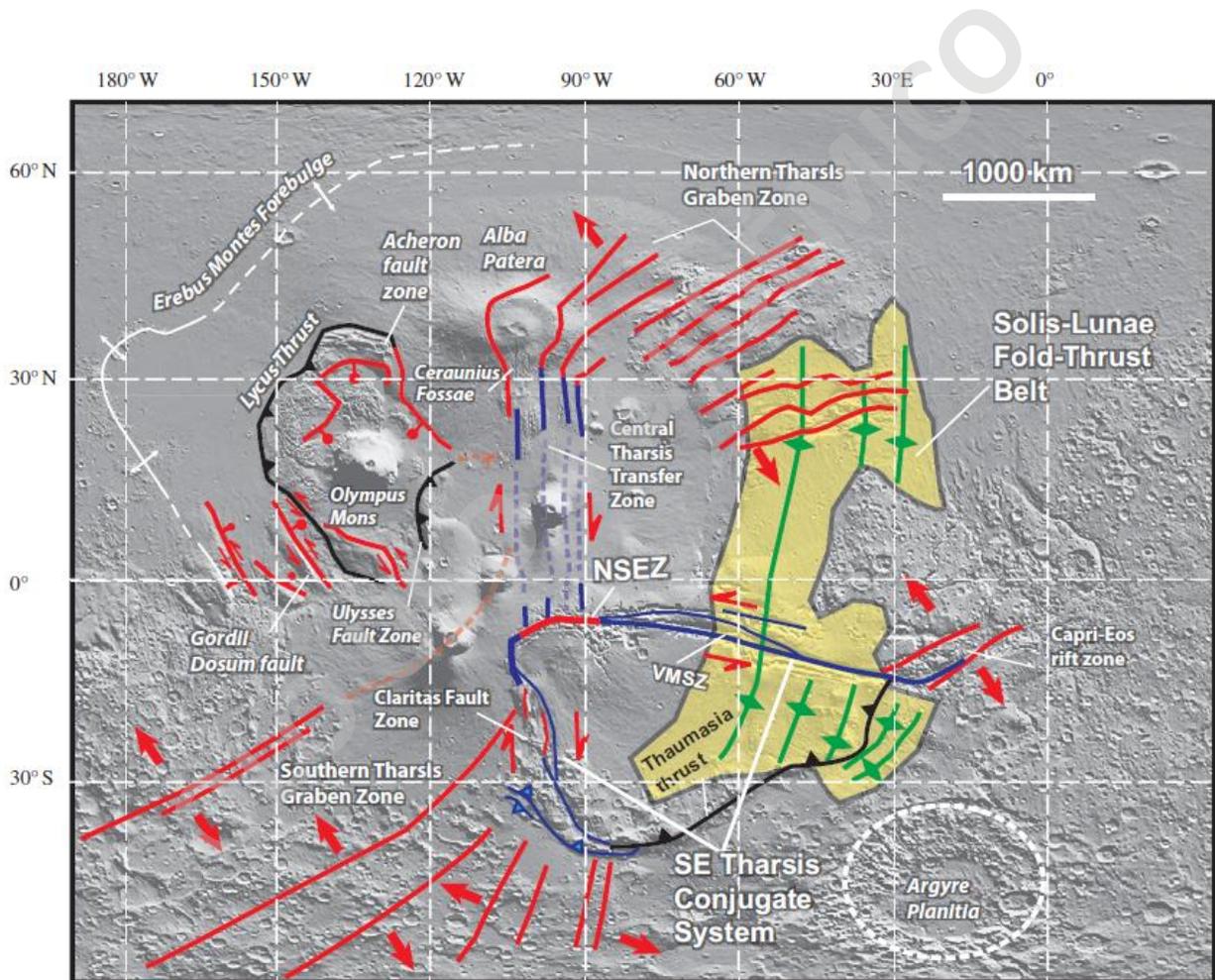


Figura 41: Modelo tectónico de la región de Tharsis según Yin (2012) y extraído del mismo estudio. Líneas azules corresponden a fallas de rumbo, líneas rojas a zonas extensionales, verdes a los llamados Wrinkle Range y negras a fallas inversas.

Otra propuesta interesante corresponde a la de Yin (2012) (Figura 41), muy similar al de Courtillot (1975), estableciendo cinemáticas importantes para el Noctis Labyrinthus en conjunto con el Valles

Marineris y los bordes de la meseta de Thaumasia. A modo general, propone un movimiento extensivo para la zona del Noctis Labyrinthus, mientras que Claritas Fossae y Valles Marineris serían fallas de rumbo transtensionales y, por último, la parte este de las Thaumasia Highlands junto con Coprates Rise corresponderían a fallas inversas (cabalgamiento).

Si bien hay una coincidencia con respecto al estudio principal sobre el Noctis Labyrinthus, en donde también se postula que tiene un régimen mayormente extensivo (al menos en lo que en este estudio se considera su última etapa), su relación con el resto de la meseta de Thaumasia no sería exactamente igual a la que se estaría considerando a grandes rasgos basada en la comparación con los modelos tectónicos de la Tierra.

5.3.2 Modelos análogos en la Tierra

Uno de los modelos anteriormente discutidos que podría ser el más similar a la situación de Marte, es el del Rift de África. En este, se homologa al Noctis Labyrinthus con el brazo Oeste del Rift de África y al Valles Marineris con el Golfo de Adén, lo cual haría a este último una zona extensional, similar a un rift (Masson, 1977, 1980; Schultz, 1991) como lo es el Golfo de Adén (Bosworth et al., 2005).

Considerando lo anterior, y la extensión regional de la meseta de Thaumasia, hay ciertas suposiciones que pueden hacerse. Por ejemplo, el hecho de que las Thaumasia Highlands sean producto de la extensión del Valles Marineris de un modo similar como ocurre hoy en día con los Montes Zagros en la Península Arábiga (Figura 42). Estos últimos, formados por el cierre del mar Neo-Thetys debido la colisión entre las placas Arábiga y Euroasiática durante el Cretácico (Sattarzadeh et al, 1999), siendo la primera de estas placas influenciada por la extensión del Mar Rojo y el Golfo de Adén hoy en día, dándole un movimiento antihorario a la placa Arábiga (Girdler, 1969).

Todo lo anterior podría correlacionarse a los procesos que formaron al Noctis Labyrinthus, Valles Marineris y la zona suroeste de las Thaumasia Highlands, por lo que queda la zona este de estas

mismas y Claritas Fossae, las cuales podrían tener una explicación muy similar si se considera a esta última también como una zona de rift, como sugirieron Hauber y Kronberg (2005) o, al menos como una zona con una tendencia extensional considerando que predominan fallas normales y desarrollo de estructuras tipo graben. La tendencia extensional de Claritas Fossae podría ser la misma que ayudó a generar la zona este de las Thaumasia Highlands y Coprates Rise.

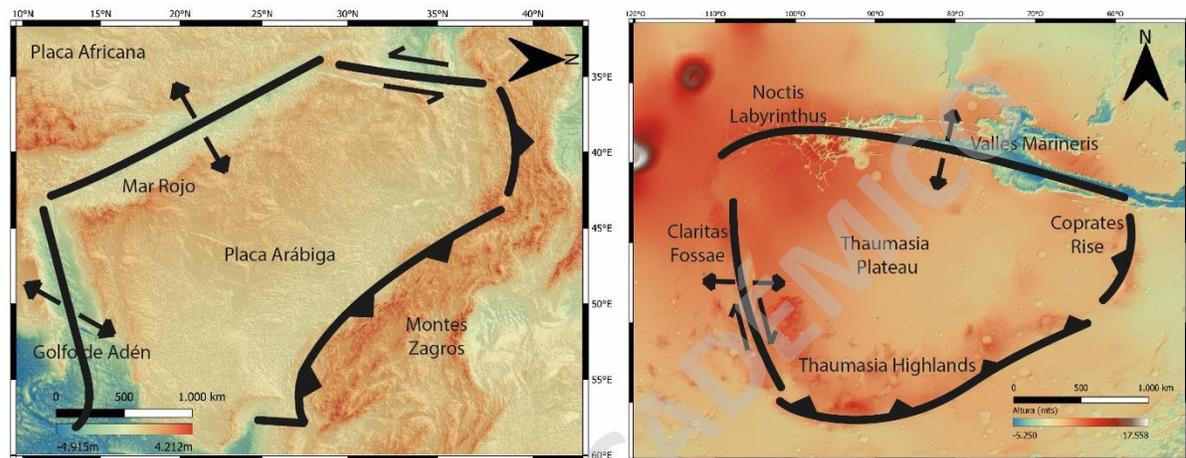


Figura 42: Placa Árbiga vs Plató de Thaumasia. Modelo tectónico de la Placa Árbiga basado en Sattarzadeh (1999) comparado con posible modelo tectónico similar de la meseta de Thaumasia. Modelo de la Placa Árbiga está girado en 90° hacia la derecha para facilitar la comparación.

A grandes rasgos Claritas Fossae es homóloga al Golfo de Adén, el Valles Marineris y el Noctis Labyrinthus al Mar Rojo y las Thaumasia Highlands junto con Coprates Rise a los Montes Zagros (Figura 42).

Toda esta propuesta cinemática estaría implicando grandes movimientos tectónicos e incluso la existencia de posibles placas, tal como propone Courtillot et al. (1975) (Figura 40) y también muy parecido a la misma Placa Árbiga. Incluso sin considerar al Valles Marineris como una fuerza principal para la formación de las Thaumasia Highlands, se puede inferir un posible movimiento de placas tectónicas para la formación de esta última. Esto lo describe muy bien Anguita (2006) al comparar las Thaumasia Highlands con el margen sureste de la placa Euroasiática (Figura 43), más específicamente en los Himalayas, justamente en la colisión entre la Placa de la India y la

Euroasiática. En resumidas cuentas, sea el modelo que sea, está siempre la implicancia de la existencia de movimientos tectónicos y, en consecuencia, placas tectónicas.

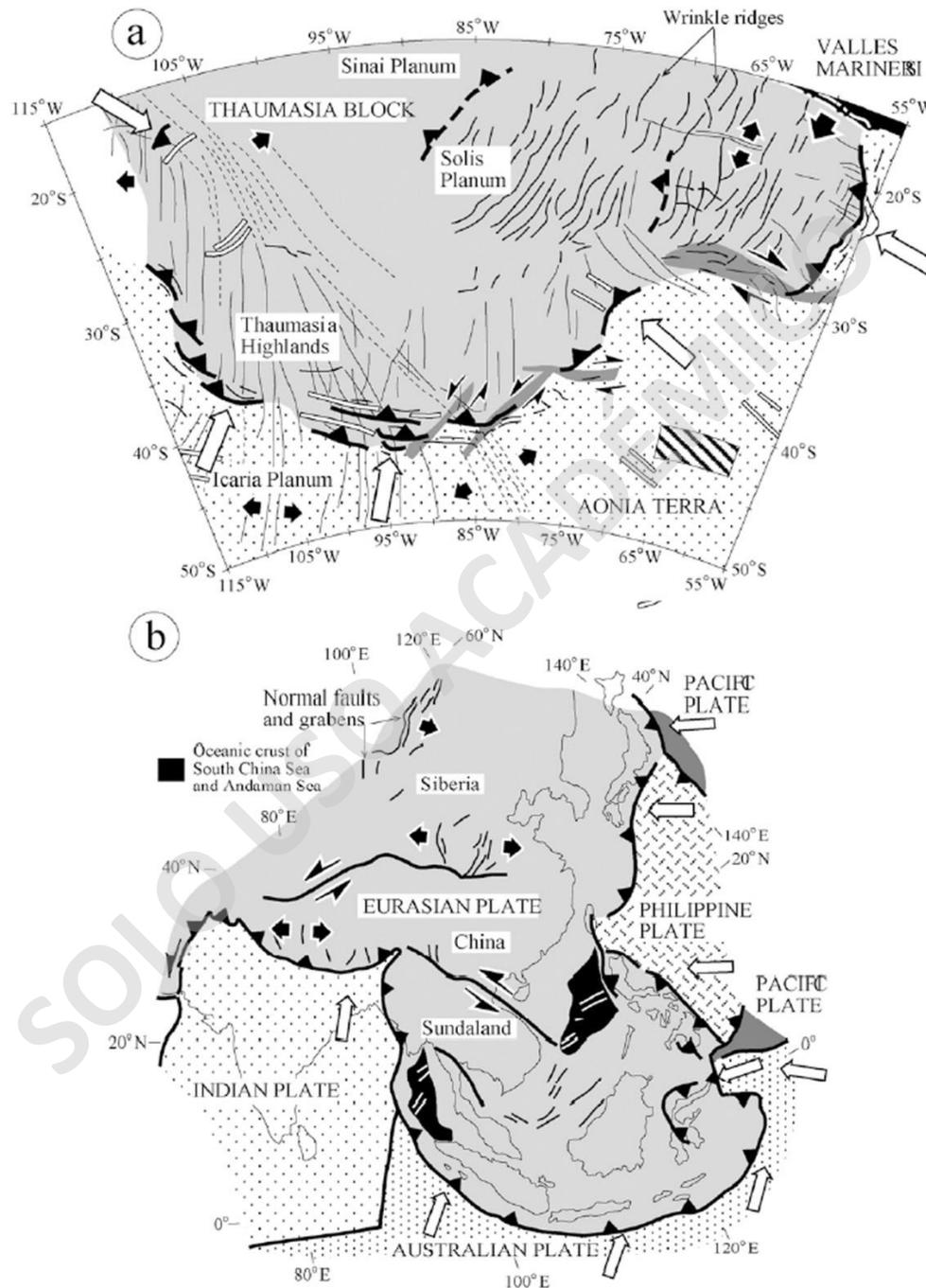
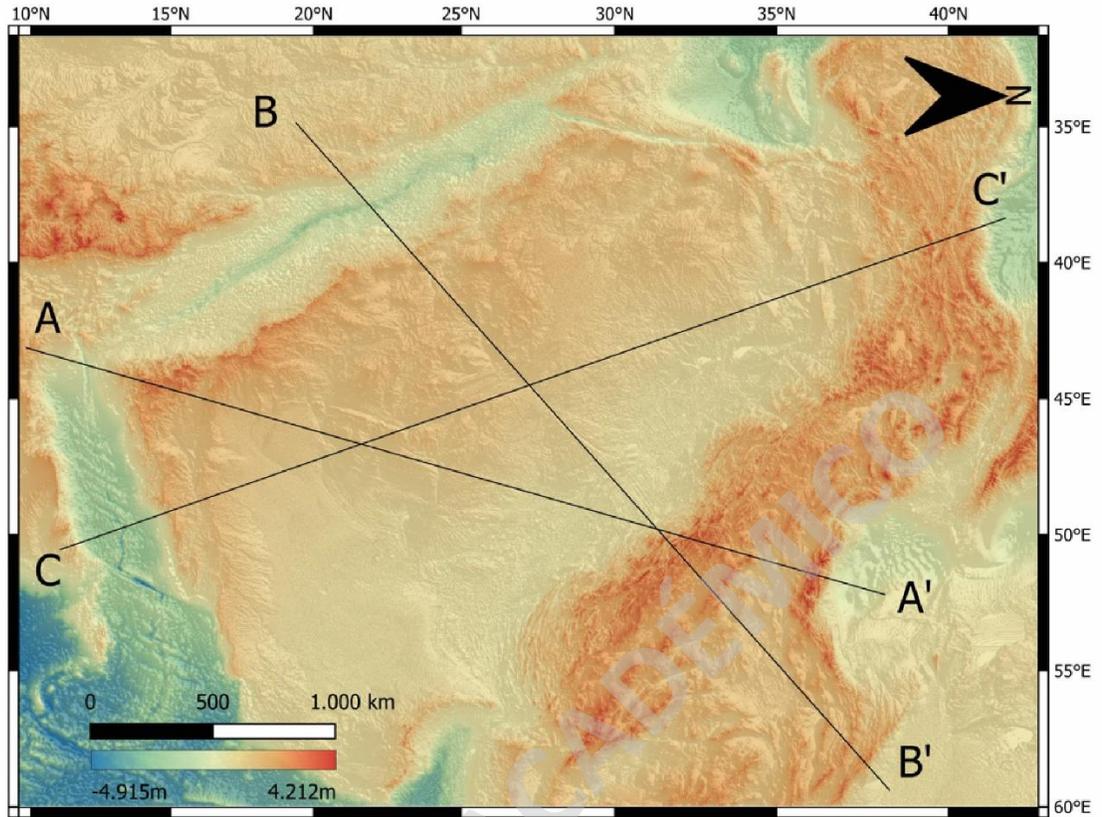


Figura 43: Comparación de modelos tectónicos entre la meseta de Thaumasia y la zona sureste de la placa Euroasiática. Extraído de Anguita et al. (2006).



Perfiles Placa Árabe

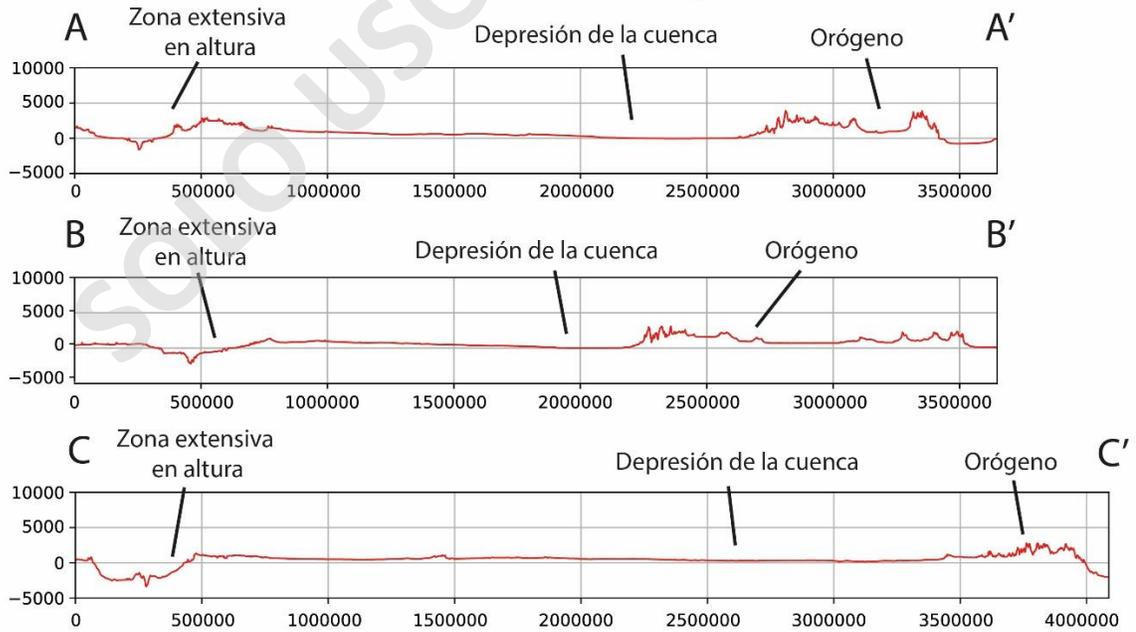
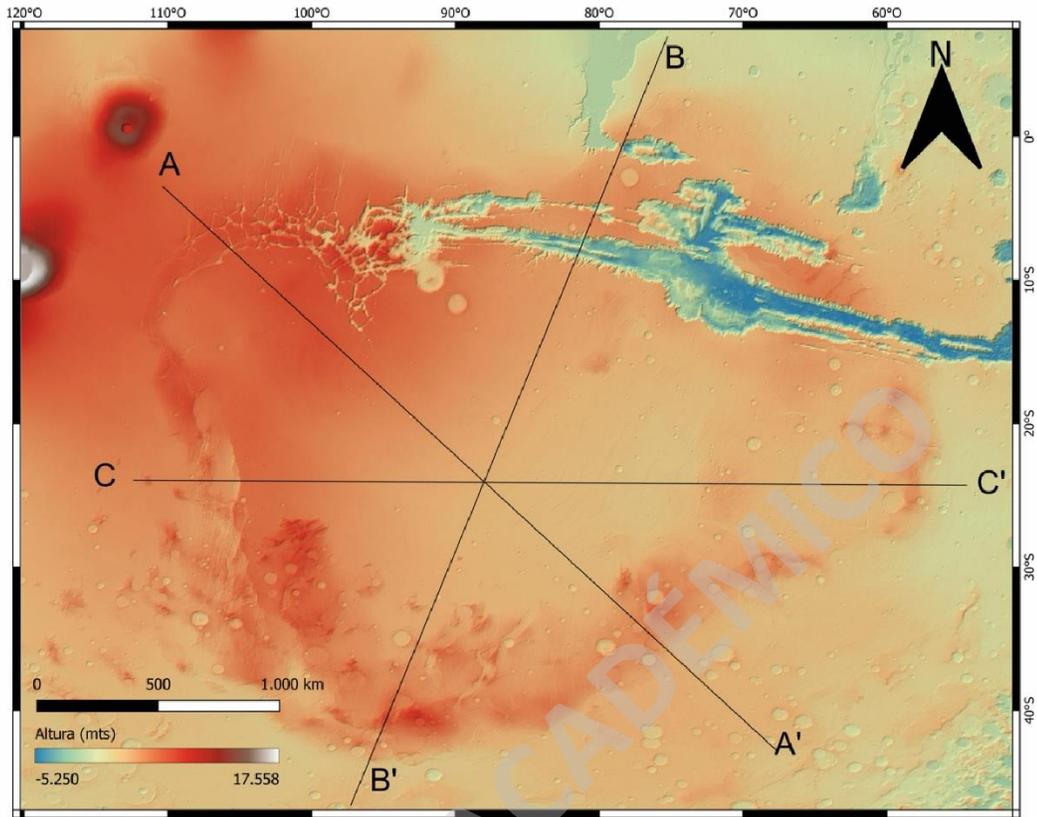


Figura 44: Perfiles transversales en la Placa Árabe.



Perfiles Meseta de Thaumasia

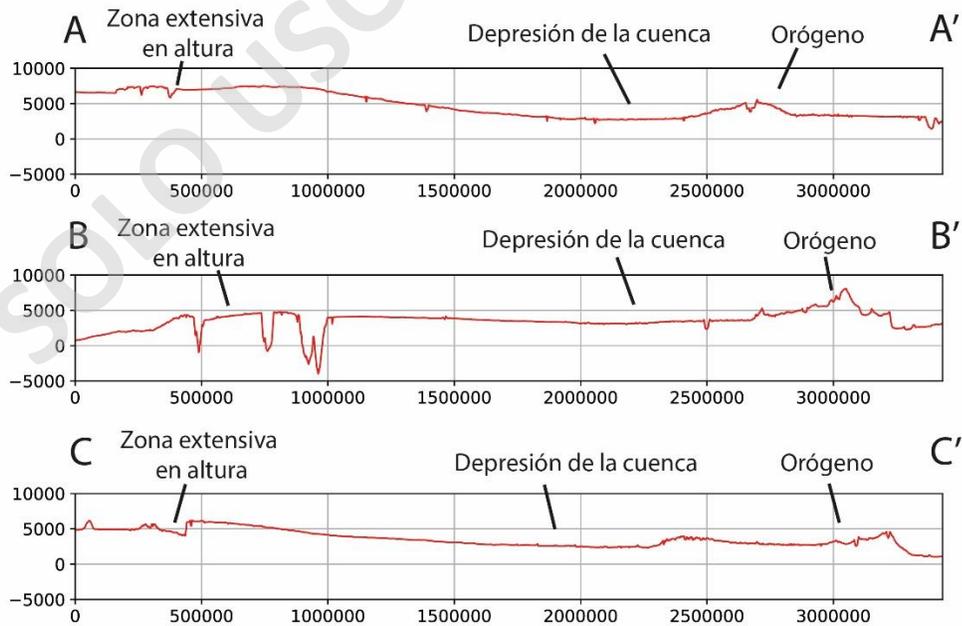


Figura 45: Perfiles transversales en la Meseta de Thaumasia.

Sumado a todo lo anterior, tampoco debe dejar indiferente las similitudes topográficas entre las estructuras que rodean y forman al Plató de Thaumasia con las de la Placa Arábica (Figuras 44 y 45). Para observar estas características similares, se han generado perfiles que son equivalentes entre ambas zonas, es decir: el perfil A-A' de la Placa Arábica, pasa por la intersección entre el Golfo de Adén y el Mar Rojo y termina pasando por los Montes Zagros; mientras que el perfil A-A' de la meseta de Thaumasia, pasa por el Noctis Labyrinthus (equivalente a la intersección del Golfo de Adén con el Mar Rojo); y las Thaumasia Highlands (equivalente a los Montes Zagros). Lo mismo ocurre con los demás perfiles.

Aun así, más allá de que haya una similitud entre cada estructura equivalente, se puede ver una similitud general en todos los perfiles mostrados, con tres características principales: (1) todos presentan cuencas en un extremo, ya sean debido a grabenes, colapso, rift o límites divergentes entre placas; (2) estas cuencas están a cierta altura elevada, la cual va disminuyendo levemente con la distancia; (3) luego de que se produce esa disminución de altura, al otro extremo del perfil, se producen orógenos de gran altura aparentemente por subducción de placas.

Ante tales similitudes generales, sería interesante entrar a cuestionar no solo el hecho de que la meseta de Thaumasia podría ser una placa tectónica como lo es la Placa Arábica, sino que, además, tendría un funcionamiento similar, con movimientos quizás similares, como el movimiento contrarreloj de esta última.

5.3.3 Temporalidad relativa

Aunque varios elementos pueden concordar en el modelo, también hay temas que no irían de acuerdo con la bibliografía actual, siendo el más relevante el de las edades relativas, en especial cuando respecta al Valles Marineris. Según Dohm y Tanaka (1999), sería un dilema atribuir la formación de la meseta de Thaumasia al tectonismo de placas, esto debido a que (1) los márgenes oeste y este de la meseta de Thaumasia son perpendiculares al Valles Marineris, (2) Estructuras compresionales comparables no ocurren al norte del Valles Marineris y (3) el Valles Marineris

pareciera haber sido altamente activo durante el Hespérico Tardío hasta el Amazónico Temprano, mientras que el alzamiento de la meseta se detuvo durante el Hespérico Tardío (Figura 46).

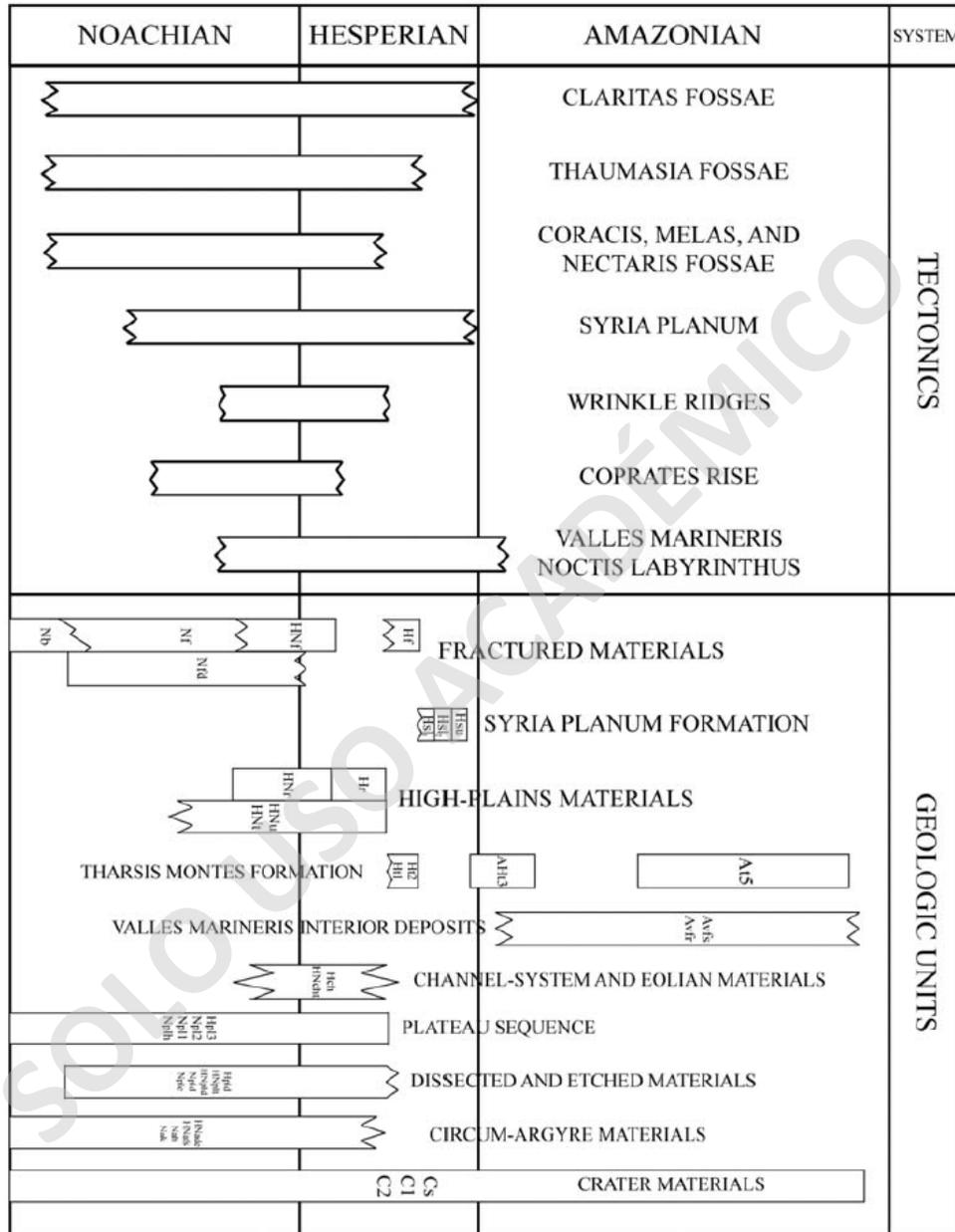


Figura 46: Recuadro cronológico y estructural de la meseta de Thaumasia. Extraído de Nahm y Schultz (2009).

Si bien la actividad más fuerte del Valles Marineris puede estar efectivamente en las edades antes mencionadas, no es difícil proponer que los primeros movimientos de extensión, quizás de menor

magnitud, pudieron haber iniciado anteriormente y a la par con la formación de las Thaumasia Highlands y posiblemente con Claritas Fossae. Esto es de suponer, claro, teniendo en cuenta que la fiabilidad del conteo de cráteres no es total a la hora de obtener edades reales de algunas estructuras, pues el mismo conteo solo considera la superficie, además de verse afectado por factores de meteorización, como lo son la erosión por el viento, o incluso el relleno de los mismos cráteres (Smith et al., 2008). También, por supuesto, se ve afectado por el factor del volcanismo, pues las mismas lavas eliminan rastros de cráteres que podrían aportar a obtener una edad más detallada (Fasset, 2016), aunque, claro, darían la edad de la superficie.

Incluso se ha demostrado que la obliteración de los cráteres producto de la erosión y otros factores, afecta a la hora de obtener una edad relativa de la zona y que esta edad variará según el nivel de erosión que se tenga (Smith et al., 2008). Sumado a esto, Smith et al. (2008) proponen un método para evitar la influencia de la obliteración de cráteres, donde obtiene como resultado que, incluso con su método, las variaciones de edades en zonas obliteradas son muy grandes, contrario a la zonas poco obliteradas, donde se puede obtener una edad más precisas.

Teniendo en cuenta la obliteración, que implica tanto erosión como relleno de cráteres, se puede observar el efecto del relleno en cuencas en contraste con zonas de gran altura. Las mismas Thaumasia Highlands, debido a su altura, muy probablemente evitaron el paso de las grandes cantidades de lava del Syria Planum y los Montes Tharsis además del relleno sedimentario posterior. A su vez, difícilmente se debió ver influencia por la posible existencia de agua en el planeta anteriormente, por lo que pudieron preservarse de mejor manera que zonas de fosas o rifts cercanos a centros volcánicos o a fuentes de agua.

Sin ir más lejos, hay zonas del Valles Marineris clasificadas como formadas dentro del Noéico (Tanaka et al., 2014), lo cual respaldaría aún más la posibilidad de que este tuvo un origen mucho más antiguo y, quizás, una fuerte actividad de la que hoy en día, al menos en superficie, no pareciera haber gran registro debido a todos los factores anteriormente mencionados.

Incluso, referenciando este mismo estudio, también hay limitaciones a la hora del mismo conteo de cráteres, pues depende bastante del área de muestreo y, por tanto, de la unidad en sí. Es el caso de las unidades E y F (Figura 19) que, al no muestrear las unidades en su totalidad y solo una parte de ellas, las edades generadas no fueron fehacientes. Si bien Tanaka et al. (2014) muestrea toda el área que comprenden sus unidades definidas, no deja de estar el problema de que, al tener la limitación de la distancia, es muy difícil definir una unidad con sus límites reales.

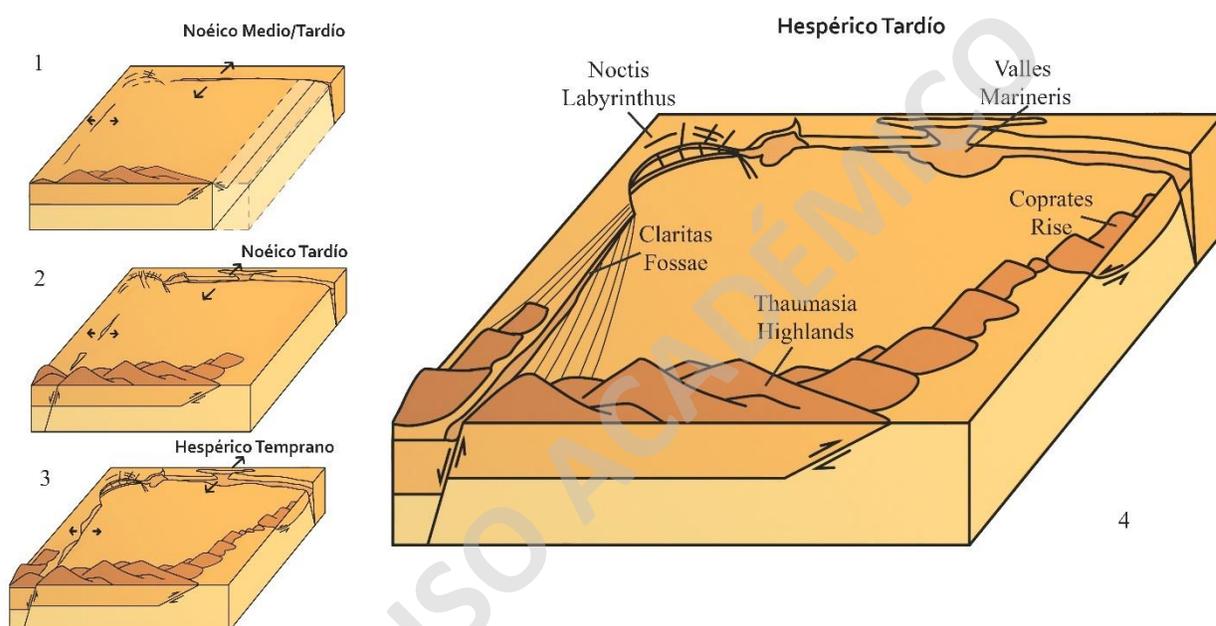


Figura 47: Modelo estructural en 3D de la posible configuración tectónica de la meseta de Thaumasia.

De lo anterior, se podría sugerir que las Thaumasia Highlands se formaran a la vez que el Valles Marineris, y que Claritas Fossae fuese un evento casi simultáneo que ayudó a formar la parte este de las Thaumasia Highlands junto con Coprates Rise (Figura 47), haciendo que todo el proceso tectónico partiera a lo menos en el Noéico Tardío (o incluso en el Noéico Medio) y que la mayor actividad tectónica se diera entre el Noéico Tardío y Hespérico Temprano, atenuándose ya hacia el Hespérico Medio.

Algo que si pudiese parecer más seguro, por relaciones de corte, es que las primeras etapas de formación del Noctis Labyrinthus son anteriores al campo de deformación que generó el Valles

Marineris y la unidad principal del Noctis Labyrinthus. Incluso, considerando que la unidad eHI tuvo una edad relativa que la situaba justo en el límite entre el Noéico Tardío y el Hespérico Temprano, no es difícil suponer que, debido a la obliteración de cráteres, esta edad corresponde de mejor manera al Noéico Tardío, o incluso antes.

Lo anterior entonces implicaría que las etapas I, II y III (contenidas en la unidad eHI) definidas para la formación tectónica del Noctis Labyrinthus corresponderían al Noéico Tardío, con la posibilidad de que las primeras etapas, o al menos la etapa I sea, quizás, algo más antigua, acercándose al Noéico Medio. Por otro lado, la etapa IV estaría vinculada a la apertura del Valles Marineris, que habría comenzado entre el Noéico Tardío y el Hespérico Temprano.

SOLO USO ACADÉMICO

6 Conclusión

El planeta Marte es aún un objeto de estudio muy reciente y también lejano para lo que es nuestra tecnología de hoy en día, por lo que son pocos los datos duros que se pueden obtener para generar teorías realmente concretas. Sin embargo, es claro que con el pasar de los años, la tecnología ha avanzado a pasos agigantados si se toma como ejemplo la comparación entre los primeros mapas geológicos de Marte con los últimos.

Utilizando las tecnologías de hoy en día y, por supuesto, estudios al respecto, se generó un mapa geológico algo más detallado de la zona correspondiente al Noctis Labyrinthus y Noctis Fossae, el cual tiene en consideración lineamientos principales, la distinción de más unidades incluyendo las cadenas de cráteres y, por último, una edad relativa obtenida por relaciones de corte y conteo de cráteres, que situarían a las primeras actividades tectónicas del Noctis Labyrinthus a lo menos dentro del Noéico Tardío.

Por otro lado, el Noctis Labyrinthus presenta una cinemática más bien extensiva en sus últimas etapas. Esta cinemática, además, estaría siendo influenciada por la extensión del Valles Marineris que, haciendo un análogo con la Tierra, sería algo similar a lo que ocurre en el Rift de África. El Noctis Labyrinthus sería el equivalente al Rift Albertino y el Valles Marineris al Golfo de Adén. La formación de las cuencas más profundas del Noctis Labyrinthus se deberían a la extensión del Valles Marineris y el volcanismo en la zona.

Finalmente, el sistema generado entre el Valles Marineris y el Noctis Labyrinthus no actúa solo, y estaría ligado al plató de Thaumasia por medio de Claritas Fossae, Coprates Rise y Thaumasia Highlands. El Valles Marineris, en su extensión, habría ayudado a formar las Thaumasia Highlands, mientras que Claritas Fossae, también en su extensión, habrían aportado a generar Coprates Rise y la zona este de las Thaumasia Highlands. Todo este modelo apoyaría entonces la teoría de que la meseta de Thaumasia pueda ser una placa tectónica con una dinámica muy similar a la de la Placa Arábiga aquí en la Tierra.

7 Bibliografía

- Aeronautical Chart And Information Center, U. S. (1962) Mars: MEC-1 Prototype. [St. Louis, Missouri: Aeronautical Chart and Information Center] [Map] Retrieved from the Library of Congress, <https://www.loc.gov/item/2013593160/>.
- Allmendinger, R. W., Reilinger, R., & Loveless, J. (2007). Strain and rotation rate from GPS in Tibet, Anatolia, and the Altiplano. *Tectonics*, 26(3), n/a–n/a. doi:10.1029/2006tc002030
- Anderson, S. y Grimm, R. E. (1998). Rift processes at de Valles Marineris, Mars: Constraints from gravity on necking and rate-dependent strength evolution. *Journal of Geophysical Res.*, 103, 11 113-11 124.
- Anguita, F., Fernández, C., Cordero, G., Carrasquilla, S., Anguita, J., Núñez, A., Rodríguez, S., García, J. (2006). Evidences for a Noachian-Hesperian orogeny in Mars. *Icarus*, v.185, i. 2, p.331-357, doi.org/10.1016/j.icarus.2006.07.026
- Bistacchi, N., Massironi, M., and Baggio, P. (2004). Large scale fault kinematic analysis in Noctis Labyrinthus (Mars). *Planetary and Space Science*, v. 52, p. 215–222, doi:10.1016/j.pss.2003.08.015.
- Beer, W. y Mädler, J.H. (1841). Beiträge zur physischen Kenntniss der himmlischen Körper im Sonnensysteme mit 7 Kupfertaf. Weimar.
- Bosworth, W., Huchon, P., & McClay, K. (2005). The Red Sea and Gulf of Aden Basins. *Journal of African Earth Sciences*, 43(1-3), 334–378. doi:10.1016/j.jafrearsci.2005.07.02010.1016/
- Bouley, S., Baratoux, D., Paulien, N., Missenard, Y. (2018). The revised tectonic history of Tharsis. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 488, p. 126-133, doi.org/10.1016/j.epsl.2018.02.019.
- Brandmeier, M. (2014). A remote sensing and geospatial statistical approach to understanding distribution and evolution of ignimbrites in the Central Andes with a focus on Southern Peru. PhD tesis suuportado by the German Science Foundation. Recuperado de: <https://www.arcgis.com/apps/OnePane/basicviewer/index.html?appid=47038ddc0628473f9f0ce67aa2eff8be>.
- Carr, M.H. (1974). Tectonism and volcanism of the Tharsis region of Mars. *Journal of Geophysical Research*, v. 79, p. 3943–3949, doi:10.1029/JB079i026p03943.
- Coles, K., Tanaka, K., & Christensen, P. (2019). *The Atlas of Mars: Mapping its Geography and Geology*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781139567428
- Condit, C. (1978). Distribution and relations of 4- to 10-km-diameter craters to global geologic units of Mars. *Icarus*, v. 34, p. 465-478, doi: 10.1016/0019-1035(78)90038-6.
- Courtillot, V.E., Allegre, C.J., Mattauer, M. (1975). On the existence of lateral relative motions on Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 25, p. 279-285, doi:10.1016/0012-821X(75)90242-3.
- Dohm, J.M., and Tanaka, K.L. (1999). Geology of the Thaumasia region, Mars: Plateau development, valley origins, and magmatic evolution. *Planetary and Space Science*, v. 47, p. 411–431, doi:10.1016/S0032-0633(98)00141-X.
- Fassett, C. I. (2016). Analysis of impact crater populations and the geochronology of planetary surfaces in the inner solar system. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 121, p. 1900–1926, doi:10.1002/2016JE005094.
- Flammarion, C. (1884). *Les Terres du Ciel*. C. Marpon et E. Flammarion, París.
- Fortezzo, C.M., Spudis, P. D. and Harrel, S. L. (2020). *Release of the Digital Unified Global Geologic Map of the Moon At 1:5,000,000- Scale*. Paper presented at the 51st Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Institute, Houston, TX.
- Girdler, R.W. (1969). The Red Sea – A Geographical Background. Egon T Degens and David A. Ross, p. 38-55, doi 10.1007/978-3-662-28603-6.
- Hartmann y Neukum (2001). *Cratering hronology and the evolution of Mars*. Kluwer Academic Publishers. *Scapce Science Reviews* 96, p. 165-194, <https://doi.org/10.1023/A:1011945222010>

- Hauber, E., Kronberg, R. (2005). The large Thaumasia graben on Mars: Is it a rift? *Journal of Geophysical Research*, v. 110, E07003, doi:10.1029/2005JE002407.
- Ivanov, B.A. (2001). Mars/moon cratering rate ratio estimates. *Space Sci. Rev.* 96, 87–104, Abril.
- Janle, P., & Erkul, E. (1991). Gravity studies of the Tharsis area on Mars. *Earth, Moon and Planets*, 53(3), 217–232. doi:10.1007/bf00055948
- Kay, S. M., Mpodozis, C., Tittler, A., & Cornejo, P. (1994). *Tertiary Magmatic Evolution of the Maricunga Mineral Belt in Chile. International Geology Review*, 36(12), 1079–1112. doi:10.1080/00206819409465506
- Klimczak, C., Kling, C.L., Byrne, P.K. (2018). Topographic Expressions of Large Thrust Faults on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 1123(8), p. 1973-1995, doi:10.1029/2017JE005448.
- Leone, G. (2014). A network of lava tubes as the origin of Labyrinthus Noctis and Valles Marineris on Mars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 277, p. 1-8, doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.01.011.
- Lowell, P. (1895). *Mars*. The Riverside Press, Cambridge.
- Magee, C., Kling, C., Byrne, P., A-L Jackson, C. (2022). Seismic reflection data reveal the 3D subsurface structure of pit craters. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 127, doi.org/10.1029/2021JE007155.
- Mage, D. y Masson, P. (1996b). Amounts of cristal stretching in Valles Marineris, Mars. *Planet. Space science*, 44, 749-781.
- Masson, P. (1977). Structure pattern analysis of the Noctis Labyrinthus– Valles Marineris regions of Mars. *Icarus*, v. 30, p. 49–62, doi:10.1016/0019-1035(77)90120-8.
- Masson, P. (1980). Contribution to the structural interpretation of the Valles Marineris-Noctis Labyrinthus–Claritas Fossae regions of Mars. *The Moon and the Planets*, v. 22, p. 211-219, doi:10.1007/BF00898432.
- Michael, G.G. (2013). Planetary surface dating from crater size–frequency distribution measurements—Multiple resurfacing episodes and differential isochron fitting. *Icarus*, v. 226, p. 885–890 doi:10.1016/j.icarus.2013.07.004.
- Michael, G. G., Neukum, G. (2010). Planetary Surface dating from crater size-frequency distribution measurments: Partial resurfacing events and statistical age uncertainty. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 294, i. 3-4, p. 223-229, doi:10.1016/j.epsl.2009.12.041.
- Nahm, A., Schultz, R.A. (2010). Evaluation of the orogenic belt hypothesis for the formation of the Thaumasia Highlands, Mars. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, E04008, doi:10.1029/2009JE003327.
- Neukum, G. and Hiller, K. (1981) Martian ages. *J. Geophys. Res.* 86, 3097–3121, doi:10.1029/JB086iB04p03097.
- Peulvast, J. y Masson, L. (1993). Erosión and tectonics in central Valles Marineris (Mars): A new morpho-structural model. *Earth Moon Planet* 6, p. 191-217, doi:10.1007/BF00572245.
- Plesia y Saunders, J.B., and Saunders, R.S. (1982) Tectonic history of the Tharsis región. *Journal of Geophysical Research*, v. 87, p. 9775–9791, doi:10.1029/JB087iB12p09775.
- QGIS Development Team (2020). QGIS Geographic Information System. QGIS Association, url: <https://www.qgis.org>.
- Schultz, R. A. (1991). Structural development of Coprates Chasma and western Ophir Planum. *Journal of Geophysics. Res.*, 96, 22 777-22 792.
- Schultz, R. A. (1995). Gradients in extension and strain at Valles Marineris. *Planet. Space Science.*, 43, 1561-1566.
- Scott, D. y Carr, M. (1978). Geologic map of Mars. USGS, doi:10.3133/i1083.
- Singh, P., Sarkar, R., Porwal, A. (2021). Origin of theater-headed valleys in the Valles Marineris región, Mars. *Icarus*, v. 368, doi:10.1016/j.icarus.2021.114599.
- Parsons, T. (2006). Chapter 7 The basin and range province. *Developments in Geotectonics*, 277–XV. doi:10.1016/s0419-0254(06)80015-7

- Proctor, R. (1870). *Other Worlds Than Ours: The Plurality of Worlds Studied under the Light of Recent Scientific Researches*. Cambridge University Press, doi: 10.1017/CBO9780511693922.
- Richardson, J. A., Bleacher, J. E., Connor, C. B., & Glaze, L. S. (2021). Small volcanic vents of the Tharsis Volcanic Province, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, v. 126, doi.org/10.1029/2020JE006620.
- Sattarzadeh, Y., Cosgrove, J.W., Vita-Finzi, C. (1999). The interplay of faulting and folding during the evolution of the Zagros deformation belt. *Geological Society*, v. 169, p. 187-196, doi: 10.1144/GSL.SP.2000.169.01.14.
- Schultz, R. (1991). Structural development of Coprates Chasma and Western Ophir Planum, Valles Marineris Rift, Mars. *Journal of Geophysical Research*, v. 96, n° E5, p. 22, 777-22,792. doi:10.1029/91JE02556.
- Schiaparelli, G. V. (1986). Memoria 6: Osservazioni astronomiche e fisiche sulla topografia e costituzione del pianeta Marte. *Memorie della Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali della R. Accademia dei Lincei*, ser.3, v. 2, 10; ser.4, v. 3; ser.5, v. 2, 3.
- Sheehan, W. (1996). *The planet Mars: a history of observation and Discovery*. The University of Arizona Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1zm2t25>.
- Smith, M.R., Gillespie, A.R., Montgomery, D.R. (2008). Effect of obliteration on crater-count chronologies for Martian surfaces. *Geophysical Research Letters*, v.35, i.10, doi: 10.1029/2008GL033538.
- Sun, W., Tkalčić, H. (2022). Repetitive marsquakes in Martian upper mantle. *Nature communications*, v. 13, p. 1695, doi.org/10.1038/s41467-022-29329-x.
- Tanaka, K. L. (1986). The stratigraphy of Mars. *Journal of Geophysical Research, Res.*, 91 (B13), E139– E158, doi:10.1029/JB091iB13p0E139.
- Tanaka, K.L. y Davis, P.A. (1988). Tectonic history of the Syria Planum province of Mars. *Journal of Geophysical Research*, v. 93, p. 14,893–14,917, doi:10.1029/JB093iB12p14893.
- Tanaka, K.L., Anderson, R., Dohm, J., Hansen, V., McGill, G., Pappalardo, R., Schultz, R., Watters, T. (2010). Planetary structural mapping. *Planetary Tectonics*, Cambridge University Press, p. 251-172.
- Tanaka, K.L., Golombek, M.P., Banerdt, W.B. (1991). Reconciliation of stress and structural histories of the Tharsis region of Mars. *Journal of Geophysical Research*, v. 96, p. 15,617–15,633, doi:10.1029/91JE01194.
- Tanaka, K.L., Skinner, J.A.J., Dohm, J.M., Irwin, R.P., Kolb, E.J., Fortezzo, C.M., Platz, T., Michael, G.G., Hare, T.M. (2014). Geologic map of Mars. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3239, Scale 1:20,000,000, p.43.
- Tosca, N. J., Knoll, A. H., & McLennan, S. M. (2008). Water activity and the challenge for life on early Mars. *Science*, 320(5880), 1204-1207.
- Trask, N. J., Dzurisin, D. (1984). Geologic map of the Discovery quadrangle of Mercury. USGS.
- Van der Pluijm, B. A., Marshak, S. (2004). *Earth Structure: An introduction to structural geology and tectonics*. W. W. Norton & Company, United States of America.
- Vaz, D., Di Achille, G., Barata, M.T., Alves, E.I. (2012). Tectonic lineament mapping of the Thaumasia Plateau, Mars: Comparing results from photointerpretation and a semi-automatic approach, *Computers & Geosciences*, v.48, p. 162-172, doi.org/10.1016/j.cageo.2012.05.008.
- Wyrick, D., Ferrill, D.A., Morris, A.P., Colton, S.L., Sims, D.W. (2004). Distribution, morphology, and origins of Martian pit crater chains. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, E06005, doi:10.1029/2004JE002240.
- Yin, A. (2012). An episodic slab-rollback model for the origin of the Tharsis rise on Mars: Implications for initiation of local plate subduction and final unification of a kinematically linked global plate-tectonic network on Earth. *Lithosphere*, v. 4, n° 6, p. 553-593, doi: 10.1130/L195.1.

8 Anexos

8.1 Anexo 1

Ambiente tectónico	Altura	Morfologías volcánicas	Estructuras predominantes	Cuencas profundas (profundidad del depocentro)	Cuencas irregulares (morfología)	Frecuencia de las cuencas	Planicies entre cuencas	Planicies (cuencas) a cada extremo
Himalayas	Alta: Hasta ~7.500 m en el perfil; 8.849 m en su cota más alta	Casi nulo	Compresivas	Profundas, de algunas alrededor de ~2.000 m	Sí	Alta y regular	Sí, pequeñas	Sí, ~1.000 m de diferencia entre ambas cuencas de retroarco y de antearco correspondientes.
Meseta de la Puna	Medio alta: Hasta ~4.500 m en el perfil	Sí, asociado a Los Andes	Compresivas	Medianas, de algunas alrededor de ~1.000 m	Sí	Alta e irregular	Casi nulas, pequeñas e irregulares	Sí, ~300 m de diferencia entre ambas cuencas de trasarco y antearco correspondientes.
Rift de África	Baja: Hasta ~1.450 m en el perfil	Sí, asociado al mismo sistema de rift	Extensivas	No profundas, de algunas alrededor de ~500 m	Sí	Alta e irregular	No	Sí, ~500 m de diferencia entre ambas cuencas. Producto de extensión tectónica -> graben.
Basin and Range	Media: Hasta ~3.000 m en el perfil	Sí, asociado a los límites de la placa norteamericana y a vulcanismo intra-placa	Extensivas	Medianas, de algunas alrededor de ~1.300 m	No	Alta y muy regular	Sí, irregulares	No.