



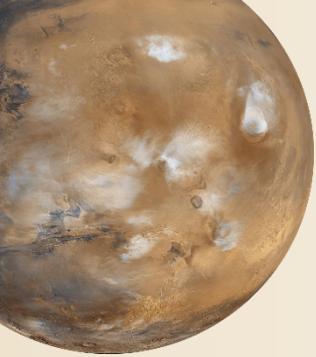
# Investigación del estado térmico actual de Marte, a partir de modelos de producción de calor y flujo térmico

Laura M. Parro<sup>1</sup>, Alberto Jiménez-Díaz<sup>1,2</sup> y Javier Ruiz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España.

<sup>2</sup> Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC, UCM), 28040 Madrid, Spain.

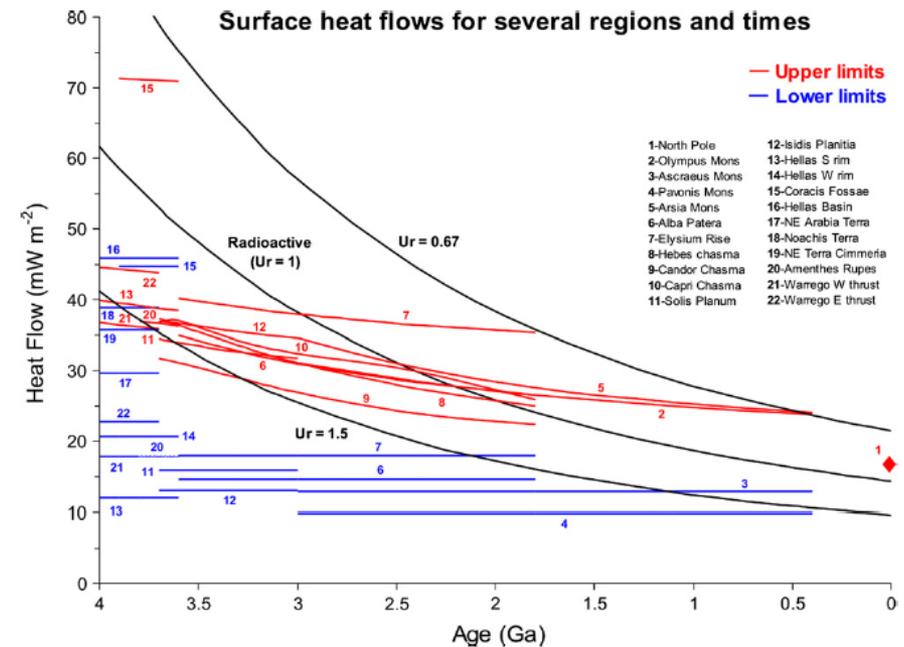
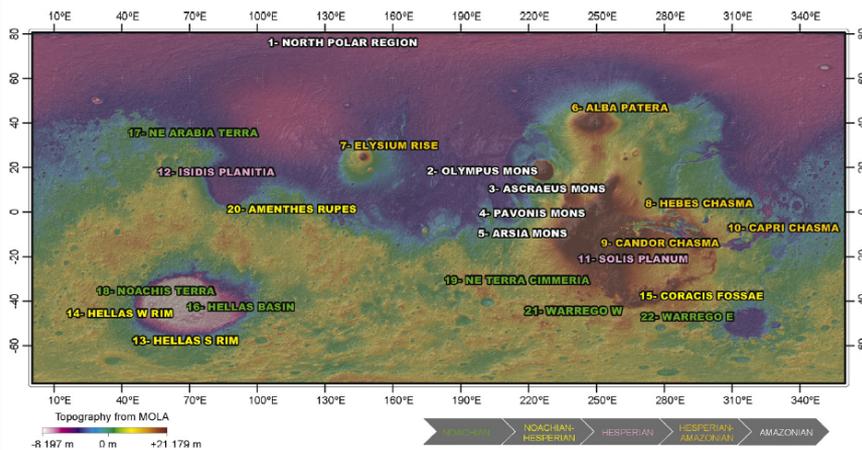




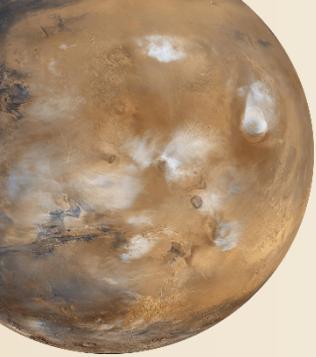
# Introducción

## MEDIDAS DE FLUJO TÉRMICO EN MARTE

- Hasta la llegada y la misión InSight, que incluye la sonda HP3 de medición de flujos térmicos, no existen mediciones de flujo térmico directas para Marte. Un método indirecto comúnmente utilizado se basa en la relación entre el estado térmico de rocas litosféricas y su resistencia mecánica; qué, aplicado a las regiones de diferentes edades, proporciona información sobre la evolución térmica de Marte (*Ruiz et al., 2011*).



Flujo térmico en el pasado (historia térmica). Ruiz et al., 2011



# Introducción

El flujo térmico total de Marte es la suma del calor generado en la corteza y el flujo térmico procedente del manto,

$$F_{\text{Total}} = F_{\text{corteza}} + F_{\text{manto}}$$

## Estado térmico actual de Marte

Modelos de  
flujo térmico

Basados en

Espesor de la  
litosfera (**b**)

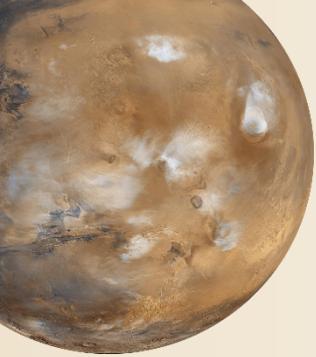
Producción  
radiactiva de calor  
(**H**)

## OBJETIVOS

- Nuevo modelo de flujo térmico mundial preliminar.
- Comprensión del patrón del flujo térmico actual de Marte.
- Implicaciones para la historia térmica de este planeta.

$$F_{\text{corteza}} = b_1 H_1$$

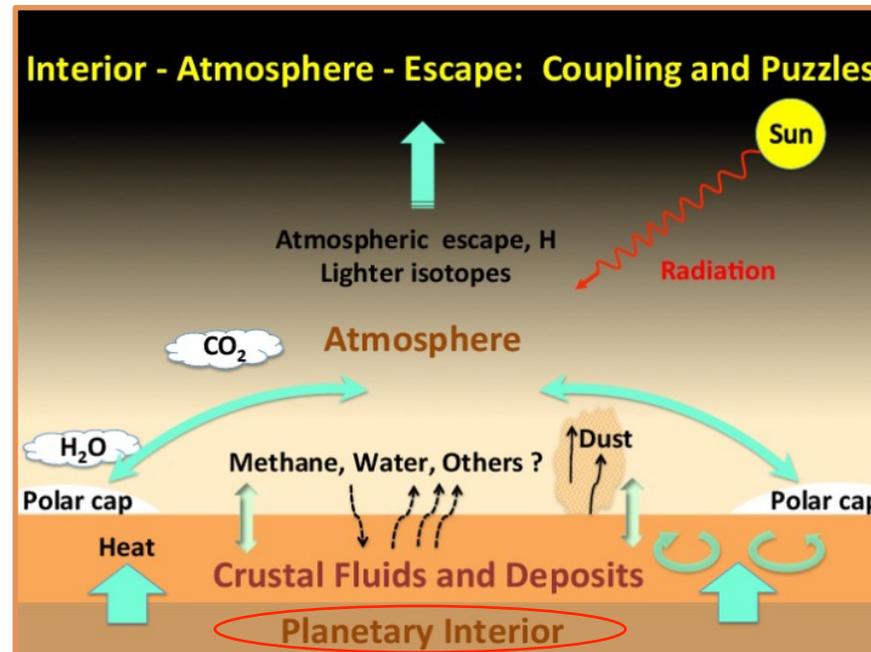
$$F_{\text{manto}} = b_2 H_2$$



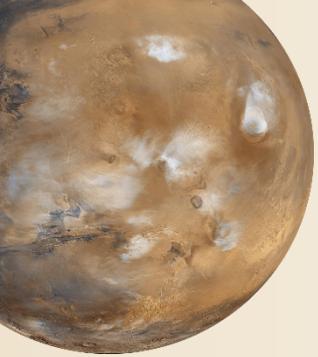
# Introducción



- Esta investigación se desarrolla dentro del proyecto UPWARDS (Understanding Planet Mars With Advanced Remote-sensing Datasets and Synergistic Studies), que es parte del programa Horizonte 2020 financiado por la Unión Europea.



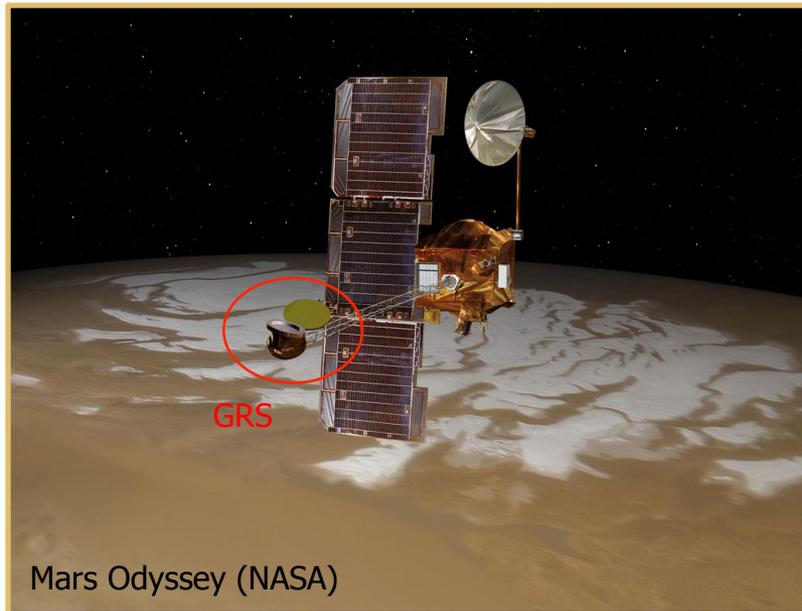
- En conjunto, los diferentes estudios e investigaciones del proyecto UPWARDS buscan tener una comprensión integrada de todo el sistema del planeta, desde la subsuperficie hasta la atmósfera superior.



# Producción de calor en la superficie (H)

## PRODUCCIÓN DE CALOR DE LOS ISÓTOPOS RADIATIVOS

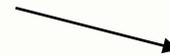
- Los principales isótopos radiactivos medidos en la corteza de Marte son el Torio (232), Uranio (238 y 235) y Potasio (40); y se denominan como elementos generadores de calor (HPEs).



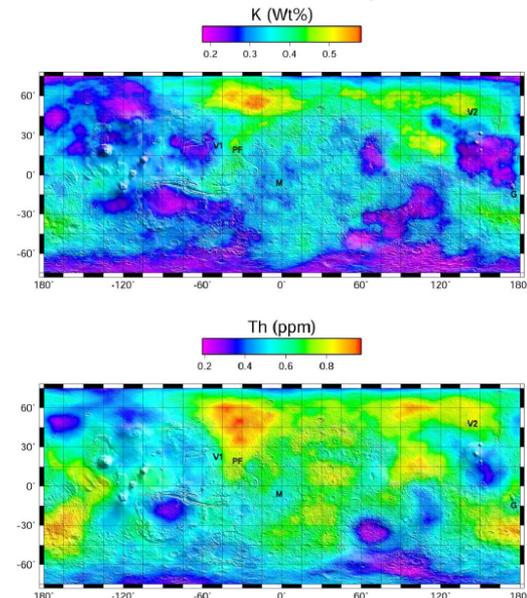
Mars Odyssey (NASA)



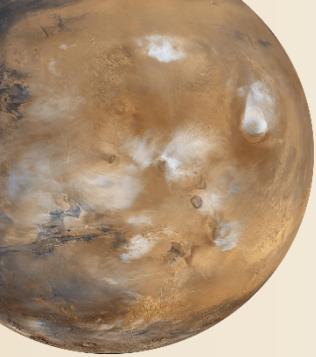
Taylor et al.  
2006



Mapas de distribución K y Th



- Las abundancias de estos elementos radiactivos en la superficie de Marte han sido medidas por el instrumento Gamma-Ray Spectrometer (GRS) a bordo de Mars Odyssey 2001. Las abundancias de los elementos radiactivos de K y Th se miden directamente, mientras que para obtener los valores de U, es necesario basarse en la asunción  $Th/U = 3,8$

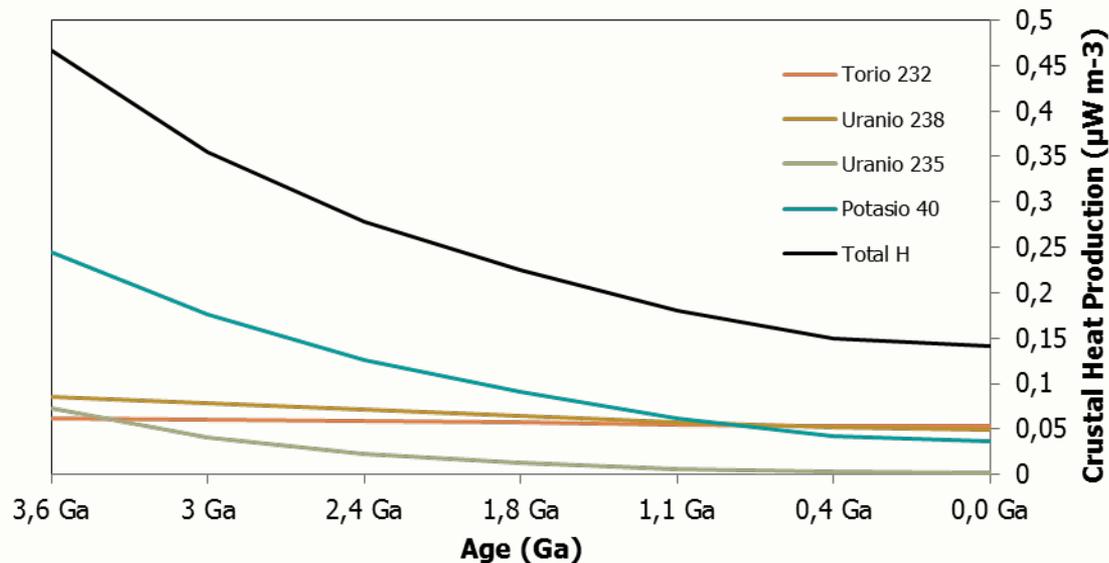


# Producción de calor en la superficie (H)

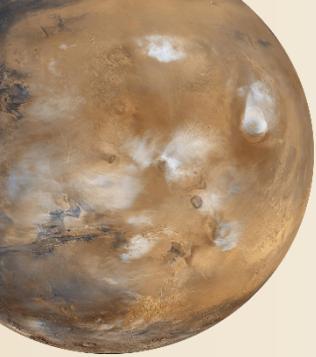
## CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN TOTAL DE CALOR EN MARTE

- Gracias a estas mediciones, es posible calcular la producción de calor de cada isótopo radiactivo ( $h$ ). La producción de calor total en la superficie de Marte ( $H$ ), resulta de la suma de los valores de  $h$  actuales:

$$H = h_{\text{Th}232} + h_{\text{U}238} + h_{\text{U}235} + h_{\text{K}40}$$



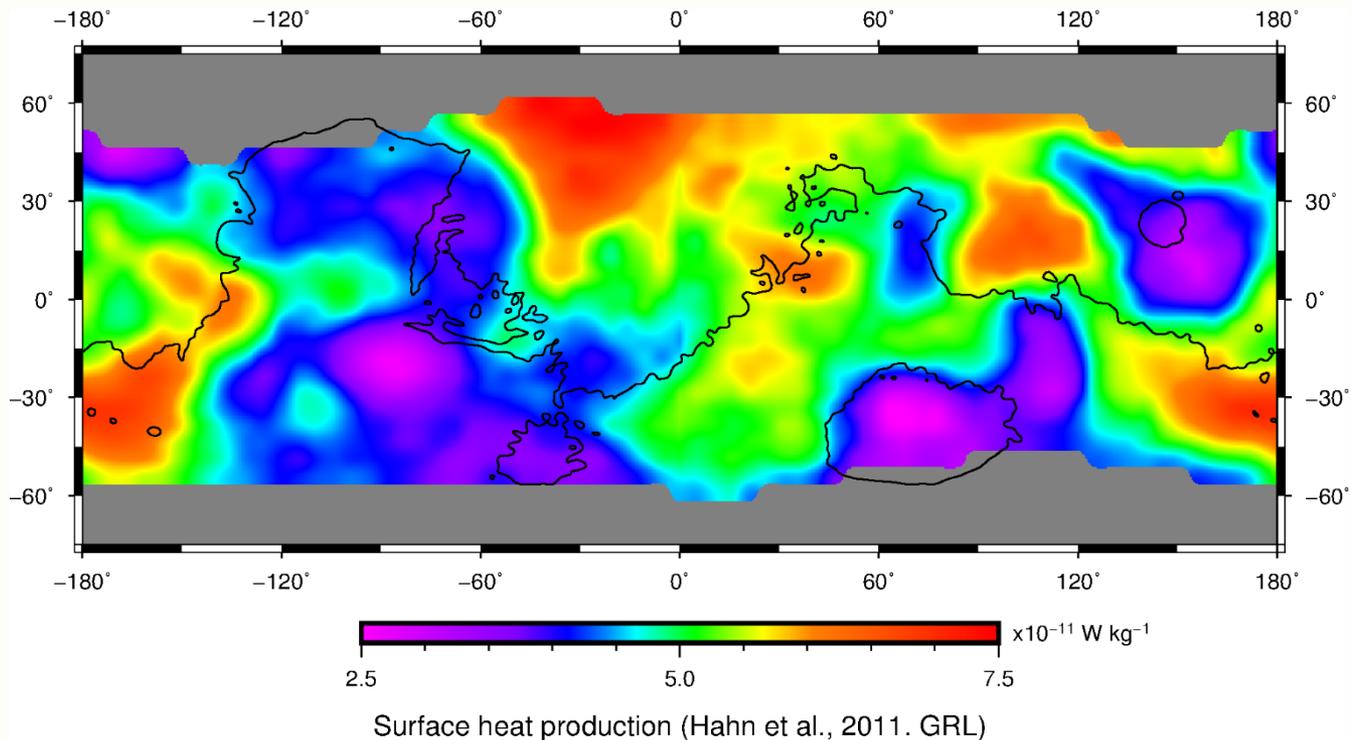
- El valor medio actual de la producción de calor en la superficie de Marte es de  $4,86 \times 10^{-11} \text{ W Kg}^{-1}$  ( $0.141 \mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$  por cada kilómetro de la columna cortical).

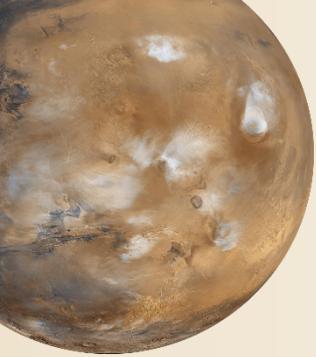


# Producción de calor en la superficie (H)

## MODELO DE LA PRODUCCIÓN DE CALOR SUPERFICIAL

- La producción de calor varía significativamente a través de la superficie de Marte.
- Los datos de H (cada 5° x 5°) calculados por Hahn et al. (2011).
- El valor más bajo de producción  $2,5 \times 10^{-11} \text{ W Kg}^{-1}$  se halla en Hellas Basin, mientras que el valor más alto de producción de calor en superficie  $7,5 \times 10^{-11} \text{ W Kg}^{-1}$  se localiza en Solis Planum.

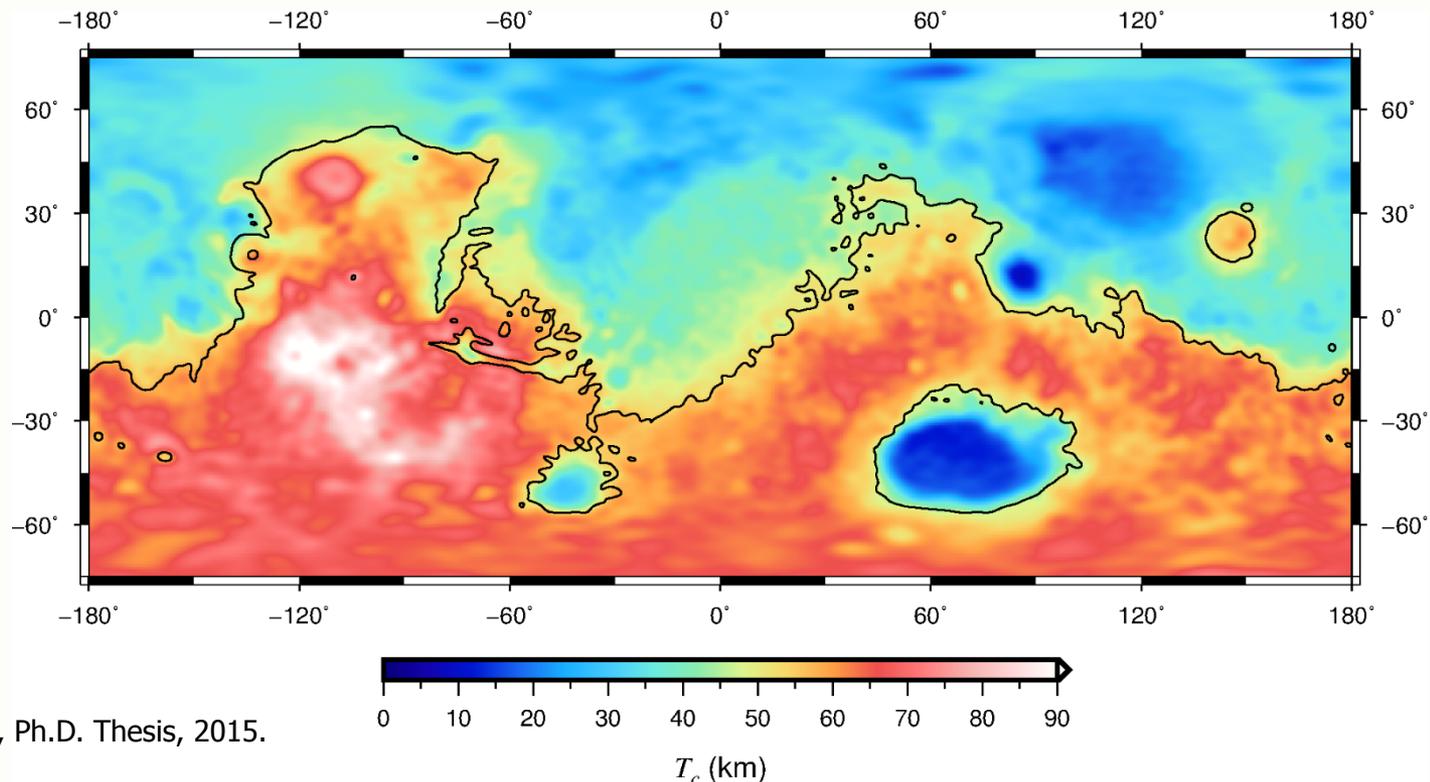


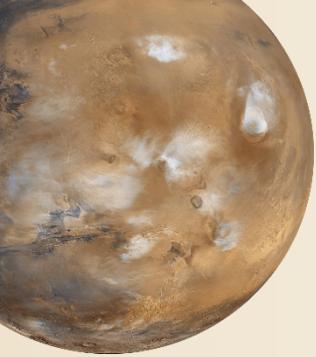


# Flujo térmico en la corteza ( $F_c$ )

## CÁLCULO DEL MODELO DE ESPESOR DE CORTEZA

- Modelo de corteza obtenido a partir del análisis de la topografía y la gravedad siguiendo el procedimiento de la teoría potencial de *Wieczorek y Phillips (1998)*, asumiendo un espesor medio de 50 km, ligeramente superior a modelos previos (*Neuman, 2004*), y más acorde con las evidencias geofísicas y geoquímicas (*Wieczorek y Zuber, 2004; McGovern et al., 2004; Ruiz et al., 2009*).

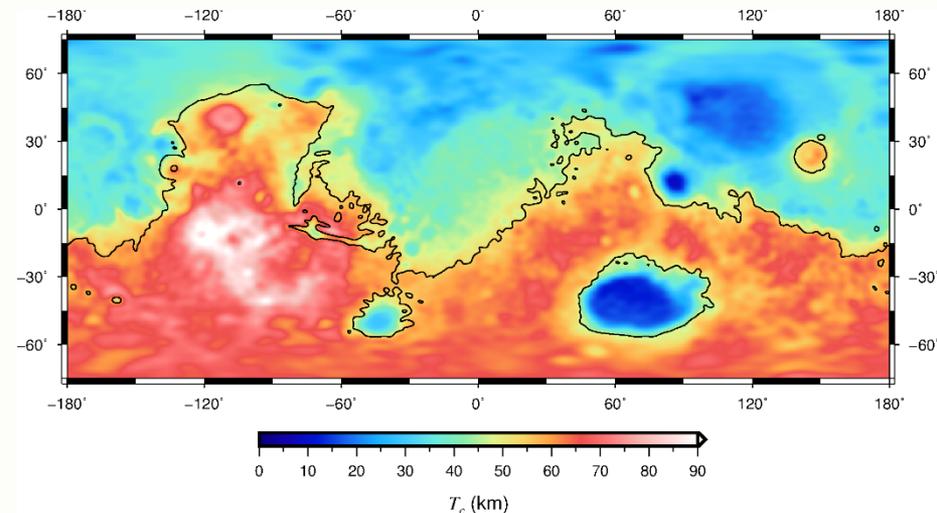
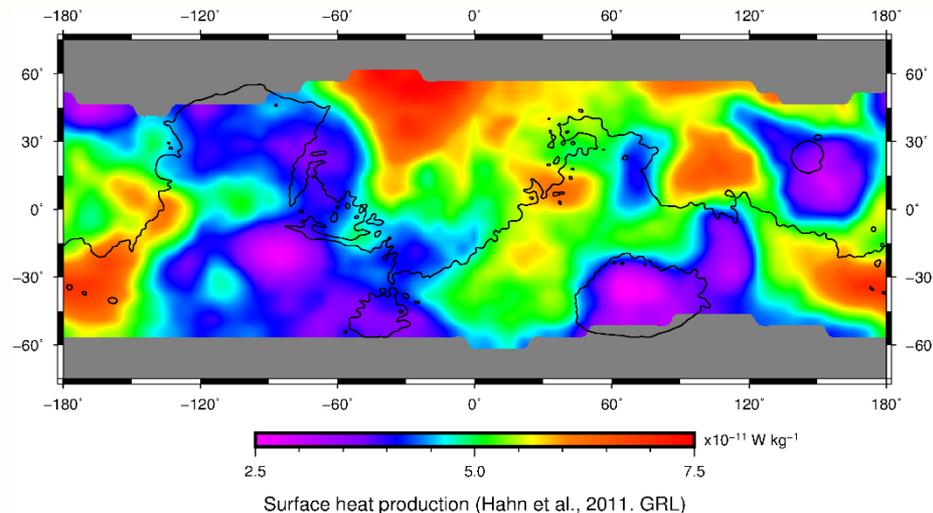




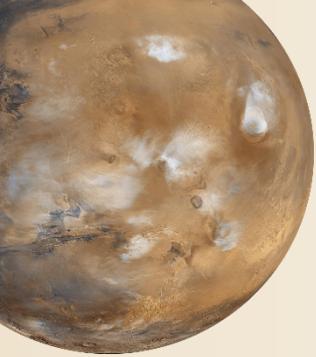
# Flujo térmico en la corteza ( $F_c$ )

## CÁLCULO DE LA COMPONENTE CORTICAL DEL FLUJO TÉRMICO

- Para hallar un valor de flujo térmico de un punto determinado del planeta, se necesita el valor de la producción de calor (basados en los datos de las abundancias de los elementos radiactivos de GRS por cada  $5^\circ \times 5^\circ$  en la zona ecuatorial de Marte) y el espesor de la corteza de ese lugar.
- Además, para expresar los valores finales en  $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , se toma un valor medio de densidad de la corteza de  $2,900 \text{ Kg m}^{-3}$  (Zuber, 2001; Spohn et al., 2001).



Densidad Corteza  
 $2,900 \text{ Kg m}^{-3}$



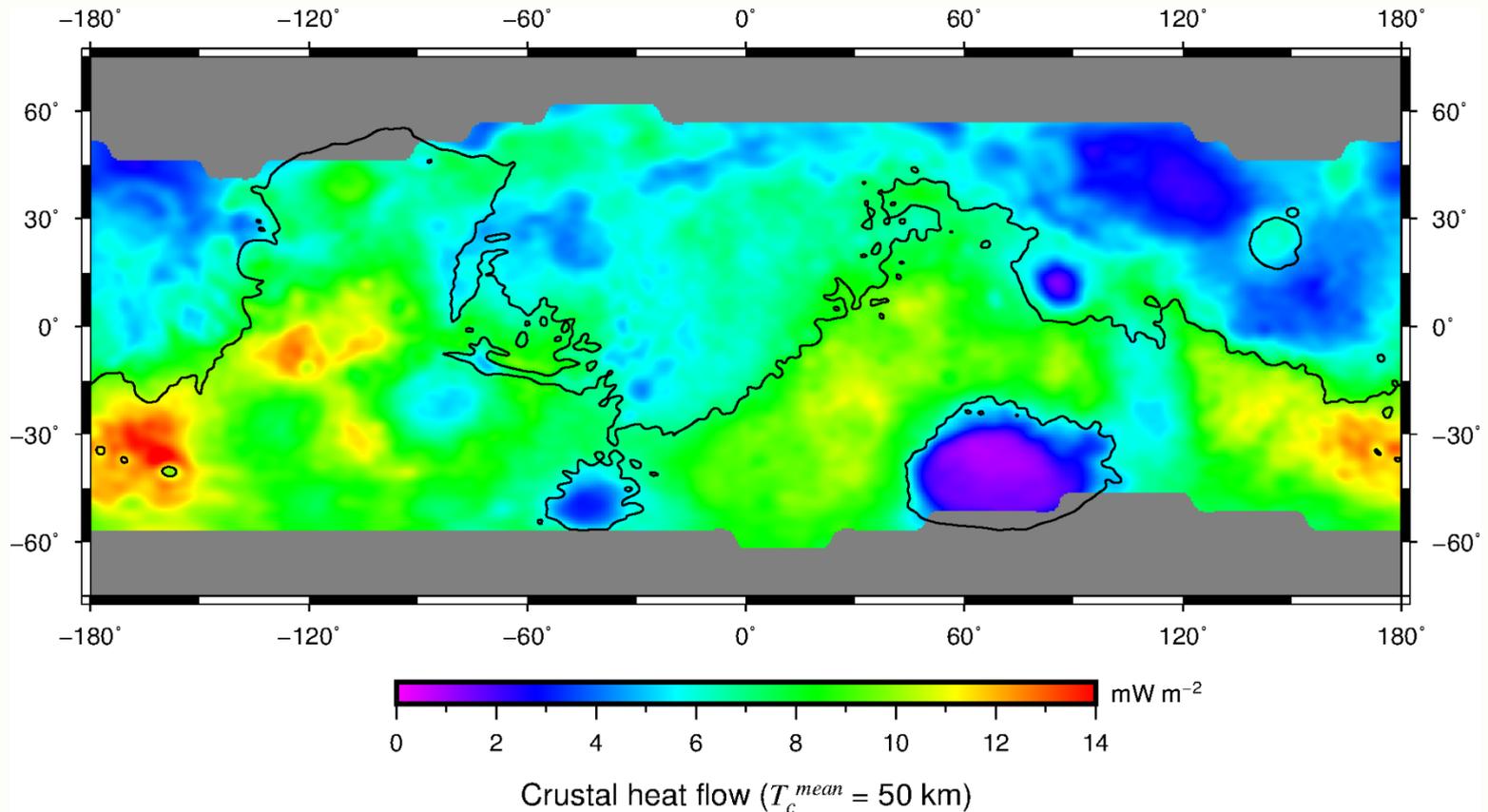
# Flujo térmico en la corteza ( $F_c$ )

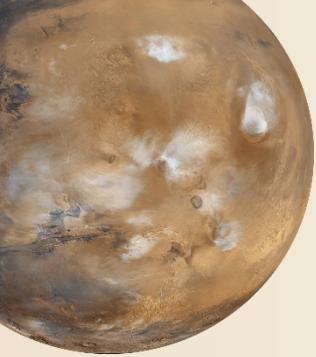
## MAPA DEL FLUJO TÉRMICO CORTICAL

Valor menor  
 $0,813 \text{ mW m}^{-2}$

Valor medio  
 $7,04 \text{ mW m}^{-2}$

Valor mayor  
 $14,63 \text{ mW m}^{-2}$

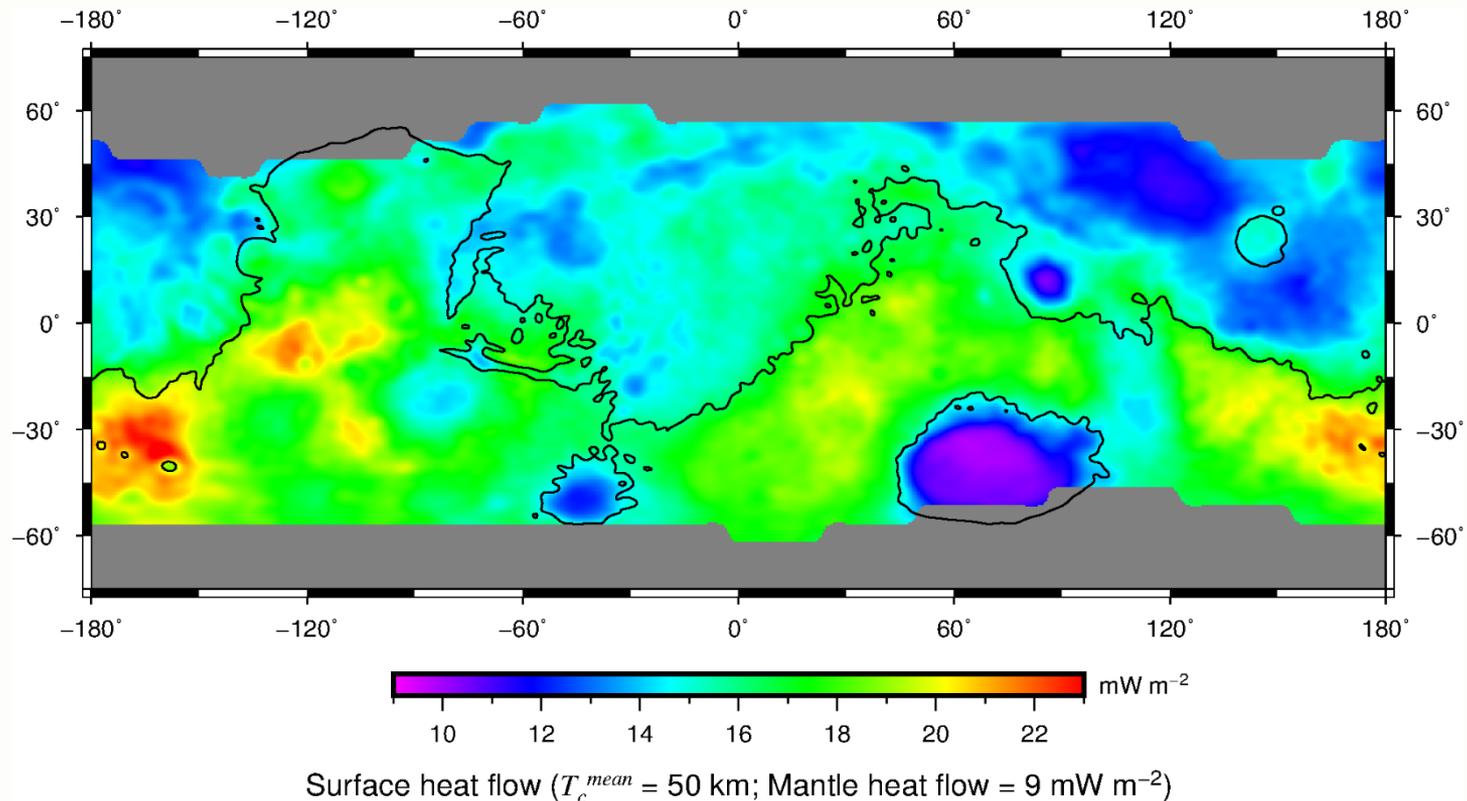


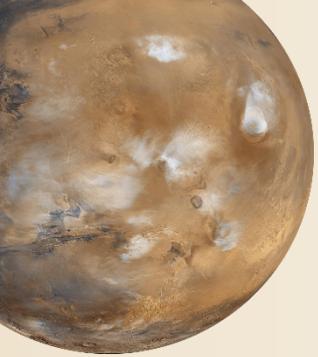


# Flujo térmico total ( $F_t$ )

## MODELO DEL FLUJO TÉRMICO SUPERFICIAL

- Para obtener valores de flujo térmico total, es preciso añadir la contribución mantélica de calor. Para este estudio se ha calculado, de manera preliminar, una aportación global del manto de  $9 \text{ mW m}^{-2}$ .
- Valores máximos de flujo térmico de hasta  $24 \text{ mW m}^{-2}$ .



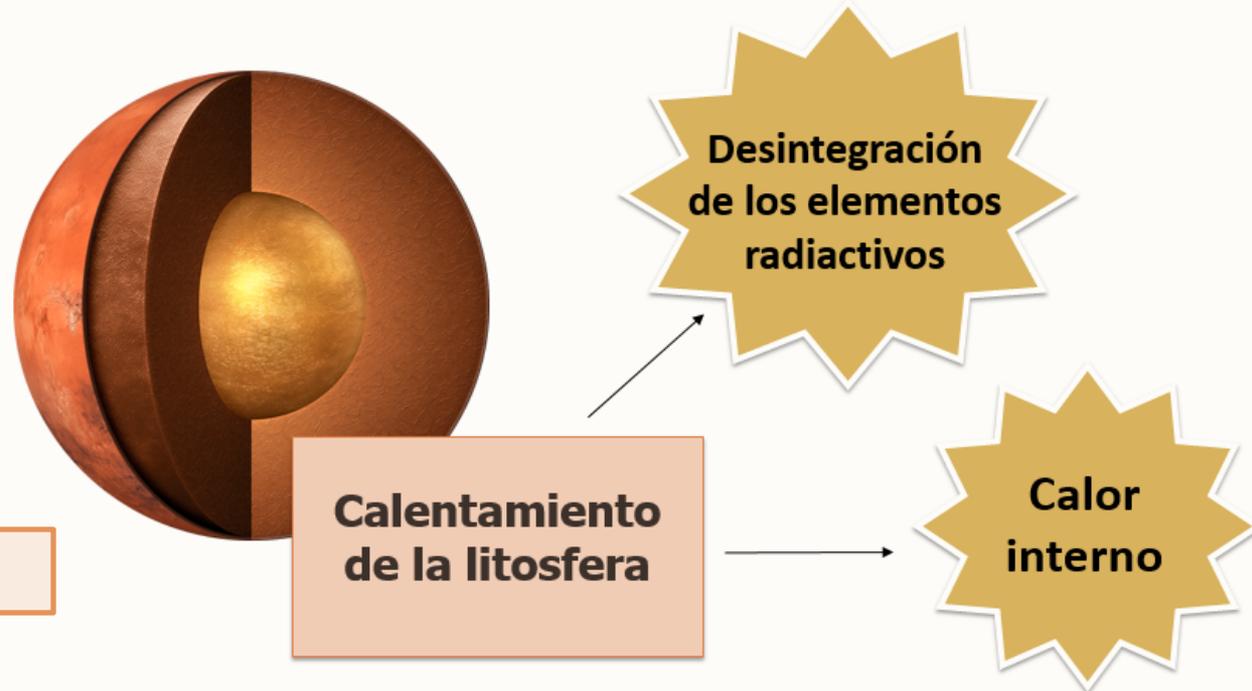


# Flujo térmico – Método del escalado

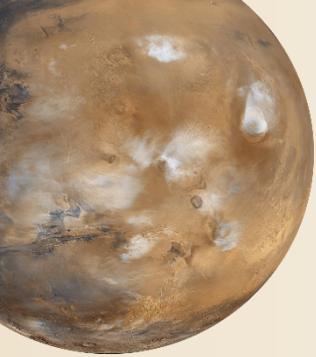
## PRODUCCIÓN DE CALOR LITOSFÉRICO

- Como se ha indicado anteriormente, el flujo de calor de superficie de Marte, es la suma del calor generado en la corteza y el flujo de calor desde el manto.

$$F_{\text{Total}} = F_{\text{corteza}} + F_{\text{manto}}$$



- A su vez, el flujo de calor del manto es consecuencia del calor producido radiactivamente en la litosfera manto (o, más generalmente, en la tapa estancada), y el calor que viene de arriba desde el interior profundo.
- Como las abundancias de los HPE en el manto litosférico están mal limitadas, aquí usamos abundancias de HPE del manto litosférico 0,1 veces mayor del valor promedio de la corteza marciana (Ruiz et al., 2011), que se traduce en  $\approx 0.017 \text{ mW m}^{-2}$  por cada kilómetro de la columna de la litosfera manto.



# Flujo térmico – Método del escalado

## ESCALADO DEL FLUJO TÉRMICO A PARTIR DE VARIACIONES EN EL ESPESOR DE CORTEZA

- Teniendo en cuenta los valores promedio de producción de calor de la corteza y del manto litosférico discutidos anteriormente, y suponiendo un flujo de calor constante desde el interior profundo, podemos escalar las diferencias de flujo térmico a través de la superficie marciana, y a partir de las diferencias topográficas y de la corteza del planeta.
- Para desarrollar nuestro modelo basado en el escalado, se calculó un flujo térmico de límite superior de 17.0 de  $T_e = 300$  km en la NPR (North Polar Region), siguiendo el procedimiento y los parámetros descritos en *Ruiz et al., (2011)*, y el uso de un espesor de la corteza de 35 km en NPR, como se deriva de nuestro modelo de espesor cortical en esta región.

$$F_{local} = F_{poloN} + H_c + (H_c - H_m)(b_{local} - b_{poloN} - t_{local})$$

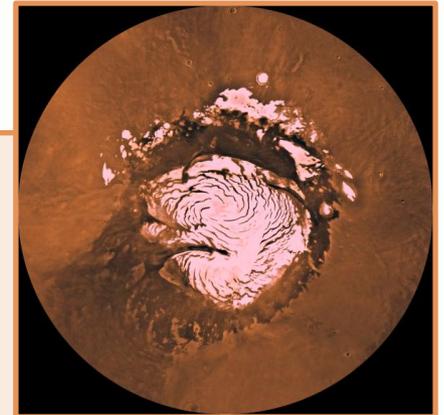
$$F_{poloN} = 16.7 \text{ mW m}^{-2}$$

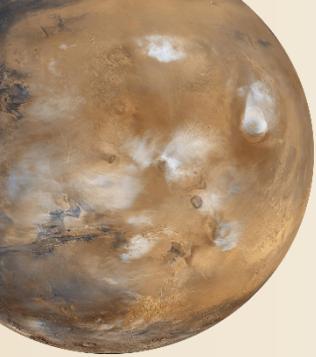
$$b_{poloN} = 30 \text{ km}$$

$$H_c = 0.14081 \text{ } \mu\text{W m}^{-3}$$

$$H_m = 0.01699 \text{ } \mu\text{W m}^{-3}$$

$t$  = diferencia entre la elevación local y la del polo Norte (sin hielo)

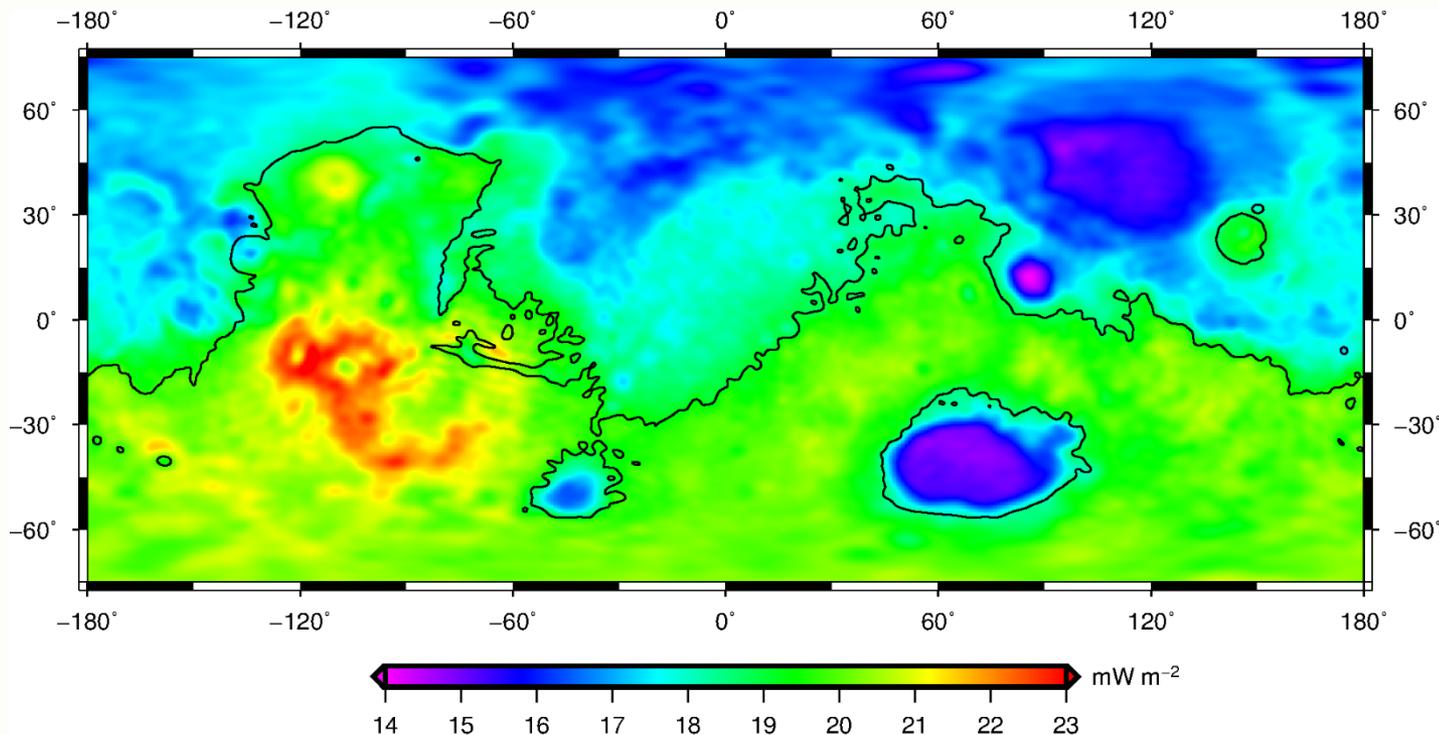




# Flujo térmico – Método del escalado

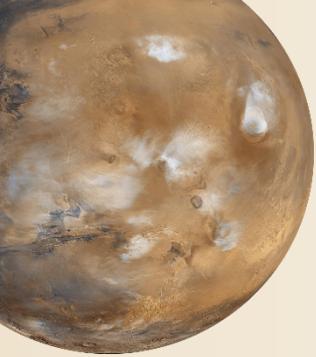
## MODELO DEL FLUJO TÉRMICO ACTUAL

- El flujo térmico de la superficie varía entre 14 y 23  $\text{mW m}^{-2}$ , con valores mínimos en las regiones de la corteza adelgazadas por cuencas de impacto gigantes, y valores máximos correspondientes a la corteza más gruesa en las regiones de Taumasia, Siria Planum y el sur Tharsis.



Valor medio  
 $18,4 \text{ mW m}^{-2}$

Present-day Surface Heat Flow



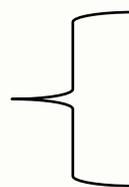
# Flujo térmico – Método del escalado

## NÚMERO DE UREY – ESTADO TÉRMICO DE MARTE

- Curiosamente, el flujo térmico de superficie promedio obtenido es  $18,4 \text{ mW m}^{-2}$ . Si tenemos en cuenta la producción radiactiva de calor actual equivalente a un flujo térmico de superficie de  $14,3$ , de acuerdo con el modelo de composición de *Wänke y Dreibus (1994)*, la relación de Urey (definido como la relación entre la producción de calor radiactivo total y la pérdida de calor total de la superficie) que se obtiene es de alrededor de  $0,8$  para la actualidad en Marte.

El Número de Urey caracteriza el grado de enfriamiento (o calentamiento) interno de un planeta:

$$U_r = \frac{F_{\text{radiactivo}}}{F_{\text{total}}}$$



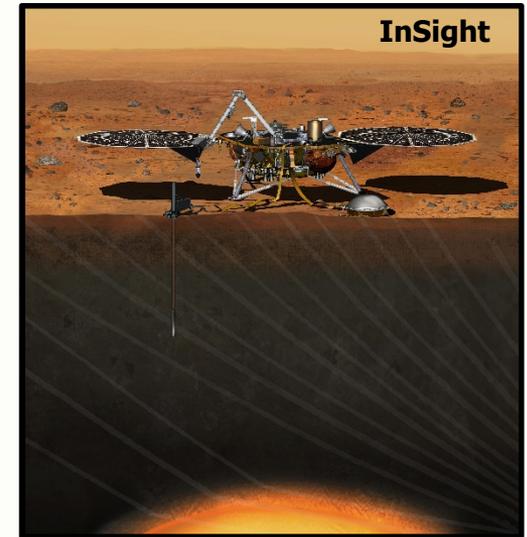
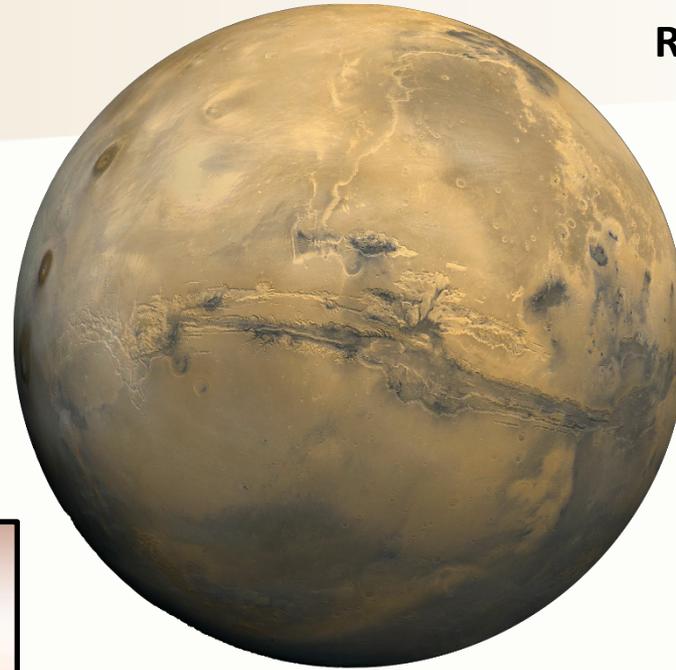
Para  $U_r < 1$  el planeta se enfría globalmente

Para  $U_r > 1$  el planeta se calienta globalmente

- Este valor es más alto de lo que ( $\approx 0.6$ ) predicen algunos modelos de evolución térmica de *Plesa et al., (2015)*, pero en consonancia con un enfriamiento interior más limitado, deducido del análisis de resistencia litosférica (*Ruiz, 2014*).

# Estado térmico actual de Marte

## RESULTADOS Y APLICACIONES

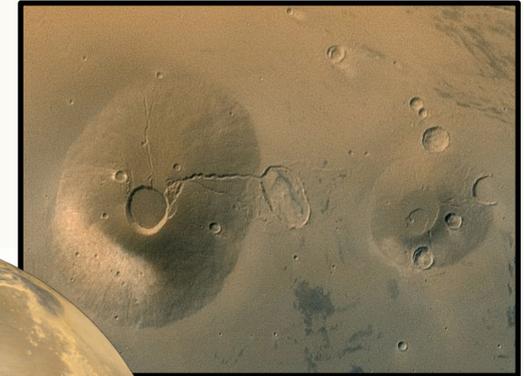


- Nuestros resultados sobre el estado térmico actual de Marte son un primer paso en la caracterización del flujo térmico global y su variación regional.
- Evaluación de las zonas específicas de aterrizaje de las próximas misiones ExoMars 2016, 2018 e InSight.

# Trabajo futuro

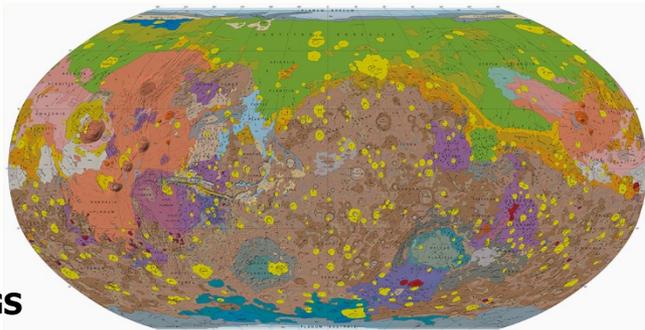
NASA

Ceraunius Tholus  
Uranus Tholus

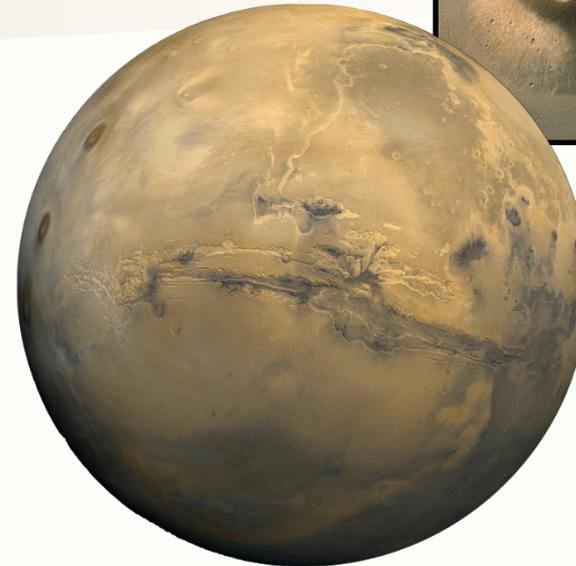


## ESTADO TÉRMICO ACTUAL

- Influencia local del vulcanismo.
- Análisis geoquímico y geológico de las diferentes provincias geológicas en Marte: tipos de rocas, composición, estructura, disposición regional, etc.
- Variaciones regionales del flujo térmico.
- Estudio geoquímico de meteoritos marcianos:
  - Condiciones de P y T<sup>a</sup> (mineralogía)
  - Constricción de la temperatura en el manto marciano.



USGS



## ESTADO TÉRMICO DE MARTE EN EL PASADO

- Marco evolutivo del estado térmico del planeta
- Modelos de temperatura y flujo térmico en el pasado.
- Estudios regionales y de provincias geológicas.
- Comparación de métodos de obtención de flujo térmico.



¡Muchas Gracias!

Laura M. Parro<sup>1</sup>, Alberto Jiménez-Díaz<sup>1,2</sup> y Javier Ruiz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España.

<sup>2</sup> Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC, UCM), 28040 Madrid, Spain.

Investigación del estado térmico actual de Marte, a partir de modelos de producción de calor y flujo térmico