

# **Cambio Climático en la Tierra**

**-Estudio comparado con Venus y Marte-**

**PARTE II**

**Julio Solís García**



***Revista Digital de ACTA***

**2023**

**Publicación patrocinada por**



**ACTA representa en CEDRO los intereses de los autores científico-técnicos y académicos. Ser socio de ACTA es gratuito.**

**Solicite su adhesión en [acta@acta.es](mailto:acta@acta.es)**

## **Cambio Climático en la Tierra -Estudio comparado con Venus y Marte - PARTE II**

© 2023, **Julio Solís García**

© 2023,  ACTA

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley.

Se autorizan los enlaces a este artículo.

*ACTA no se hace responsable de las opiniones personales reflejadas en este artículo.*

Finalizamos el artículo con esta Parte II que incluye los capítulos de Marte, del origen y evolución de los tres planetas interiores desde el punto de vista climático, y de algunas conclusiones sobre nuestra responsabilidad en el actual Cambio Climático que padecemos...

## MARTE, DESÉRTICO Y FRÍO

*"He amado a las estrellas con demasiado cariño como para tener miedo de la noche"*  
**Galileo Galilei** (1564-1642), padre de la física y de la astronomía modernas

Se reconoce fácilmente en la bóveda celeste por su tono "rojizo", ¡que nadie espere ver una deslumbrante luz roja!, y su gran brillo, aunque este es mucho más variable que el de Venus o Júpiter, y depende mucho de su posición orbital respecto a la Tierra. Puede llegar a brillar tanto como Júpiter, pero también pasar desapercibido como una estrella de segunda magnitud.

Las civilizaciones más antiguas lo identificaron pronto entre los astros más significativos, la civilización romana relacionó su tono rojizo con el dios de la guerra, hijo de Júpiter y Juno, y de ahí su nombre actual; siendo "Ares" (hijo de Zeus y Hera) su denominación en la anterior cultura griega.

La primera persona que tuvo el privilegio de observar la superficie de Marte fue posiblemente el neerlandés Christiaan Huygens (1629-1695), valiéndose de un pequeño telescopio refractor de fabricación propia. Observando el movimiento de una región nebulosa de la superficie (que hoy conocemos como "*Syrtis Major*") a lo largo de los días, fue capaz de deducir que el periodo de rotación del planeta rojo es de unas 24 horas, prácticamente igual al terrestre. Apenas un lustro después, el astrónomo italiano Giovanni Cassini (1625-1712) descubrió la existencia de casquetes polares, que guardaban una sorprendente semejanza con los de la Tierra, si bien hubo que esperar más de un siglo hasta que William Herschel sugiriera que estos casquetes estaban constituidos por hielo.

No terminan ahí las semejanzas con la Tierra. El propio Herschel descubrió que el ángulo de inclinación del eje de rotación, la oblicuidad, es muy parecido al de nuestro planeta ( $\sim 24^\circ$ ). Eso significa que Marte también posee estaciones, aunque como invierte casi dos años terrestres en dar la vuelta al Sol y su órbita es mucho más alargada que la nuestra, no todas las estaciones tienen la misma duración. La primavera y el verano boreales son más largos (178 y 194 días marcianos) que el otoño e invierno (143 y 154 "soles" respectivamente), aunque para compensar, el perihelio se alcanza a finales de otoño y el afelio a finales de la primavera. Para el hemisferio austral la situación es inversa, tal y como ocurre en la Tierra. La fisonomía de la superficie marciana experimenta también cambios estacionales, durante la primavera y verano el casquete polar correspondiente se encoge y las zonas oscuras, que en ocasiones parecen verdosas, destacan más sobre su entorno.

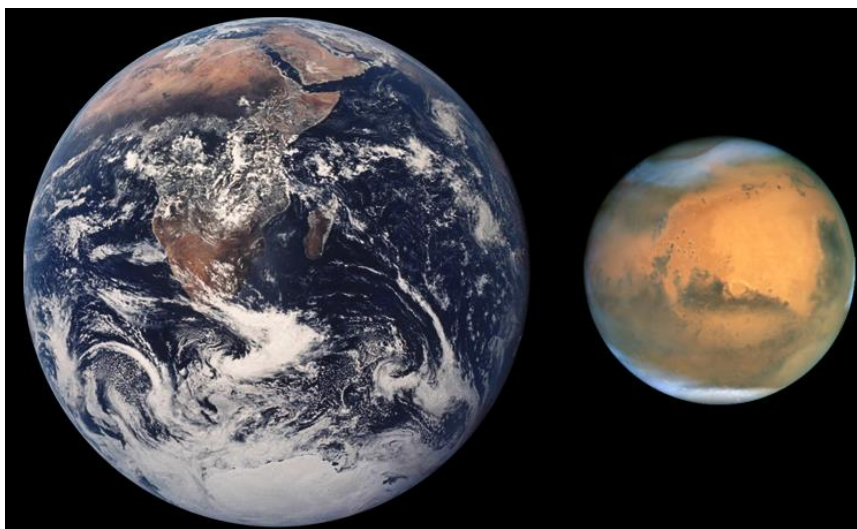
El astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli, aprovechando el momento de máximo acercamiento (oposición favorable) entre los dos planetas durante el año 1877, identificó una serie de formaciones lineales en su superficie a las que bautizó como "canali", que se tradujo erróneamente al inglés como "canals" en lugar de "channels". La primera denominación alude a una construcción artificial, mientras que la segunda se refiere a una formación natural del terreno. Parece ser que fue esta traducción errónea la que provocó que muchos vieran en los "canali" el resultado de una compleja obra de ingeniería de una avanzada civilización.

Por su parte, el adinerado hombre de negocios, astrónomo y escritor estadounidense Percival Lowell (1855-1916), pensó que estas estructuras servirían para canalizar y transportar el agua desde los polos hasta las pocas zonas verdes esparcidas por el planeta, imaginándolo como un árido planeta en extinción cuyos habitantes luchaban por sobrevivir en tan hostiles condiciones. Sin duda, tarde o temprano sus desesperados pero avanzados habitantes abandonarían el planeta e invadirían nuestro paradisíaco planeta, repleto de recursos. Lowell llegó a construir un observatorio en Arizona, dedicado principalmente al estudio de la superficie marciana, desde donde elaboró una auténtica cartografía incluyendo más de 160 "canales". Argumentos de este tipo pasaron a la cultura popular gracias a los libros del propio Lowell y de numerosos escritores de ciencia ficción.

Hasta mediados del siglo XX, se pensaba que la variación en la coloración del planeta era debida a los cambios estacionales de la vegetación. La situación cambió drásticamente en el verano de 1965 cuando, tras seis fracasados intentos estadounidenses y soviéticos, la sonda "Mariner 4" de la NASA consiguió sobrevolar el planeta y enviar 21 fotografías en blanco y negro de su superficie, en las que lejos de encontrar vestigio alguno de vegetación, se observó una superficie árida y rocosa con numerosos cráteres.

De existir vida en el planeta marciano, no sería desde luego en la forma en la que la habían imaginado Lowell y sus seguidores. En 1907, Percival Lowell estimó que la temperatura media de Marte era de unos 8 °C, lo cual permitiría la existencia de agua líquida en su superficie, que fluiría por sus "canales", aunque no había consenso científico al respecto. Entre los discrepantes, el naturalista británico Alfred Wallace (1823-1913), codescubridor de la Teoría de la Evolución junto con Darwin, se preguntaba ¿Cómo era posible que un planeta tan alejado del Sol pudiera gozar de un clima tan benigno? Aunque el razonamiento de Wallace es válido, no es la distancia al Sol el único factor que determina el clima de un planeta. En el caso de la Tierra, y sobre todo de Venus, el efecto invernadero producido por los gases de la atmósfera, puede contribuir a aumentar notablemente la temperatura del planeta. No es este el caso de Marte, pues aunque posee una atmósfera, esta es mucho más tenue que la de Venus, e incluso que la de la Tierra (esto permitió de hecho a Schiaparelli y Lowell cartografiar la superficie marciana con telescopios terrestres), y el efecto invernadero en Marte es poco significativo.

Marte, es bastante más amigable que Venus, ya no tendremos que soportar presiones aplastantes, temperaturas abrasadoras, o una atmósfera corrosiva. Su tamaño es la mitad que el de La Tierra, cuenta con una masa  $\sim 10$  veces menor y la fuerza de la gravedad en su superficie es el 38% de la nuestra. Es el cuarto planeta del Sistema Solar en orden de distancias crecientes al Sol, gira a su alrededor en  $\sim 687$  días y le separan del mismo  $\sim 227$  millones de kilómetros (Figura 19).



*Figura 19: Tamaños comparados Tierra - Marte (Wikimedia Commons)*

Su órbita es elíptica, con la segunda mayor excentricidad ( $e=0,09341$ ) de todos los planetas del Sistema Solar después de Mercurio. Como hemos visto, presenta estaciones que duran aproximadamente el doble que en la Tierra, debido básicamente a la inclinación de su eje de rotación, que es de  $\sim 25^\circ$ , también tiene casquetes polares y una atmósfera muy ligera. Otra similitud es la duración de sus días, con algo más de 24 horas de periodo de rotación.

A pesar de todo, esas estaciones no provocan demasiados cambios en el paisaje, salvo variaciones en la extensión de las masas de hielo polar y el oscurecimiento de algunas zonas de su superficie por procesos químicos, al no haberse podido confirmar aún la existencia de algún tipo de vida, o de otro tipo de fenómenos, que pudiera justificar dichos cambios estacionales.

La sensación que se podría tener sería parecida a la existente en el desierto de Arizona (Figura 20), pero con un clima ártico, 7 hPa de presión atmosférica en superficie, temperatura durante el día (casi siempre soleado) de unos  $-50^\circ\text{C}$  de media, aunque en verano y en zonas ecuatoriales se pueden registrar hasta  $+20^\circ\text{C}$ , que llega a descender hasta  $-80^\circ\text{C}$  durante la noche, y una tenue capa de ozono insuficiente para detener la radiación solar ultravioleta (Figura 21).



Figura 20: Foto tomada por el rover "Curiosity" el 8 de septiembre de 2016 en la ladera del Monte Sharp  
Crédito: NASA/JPL-Caltech/MSSS

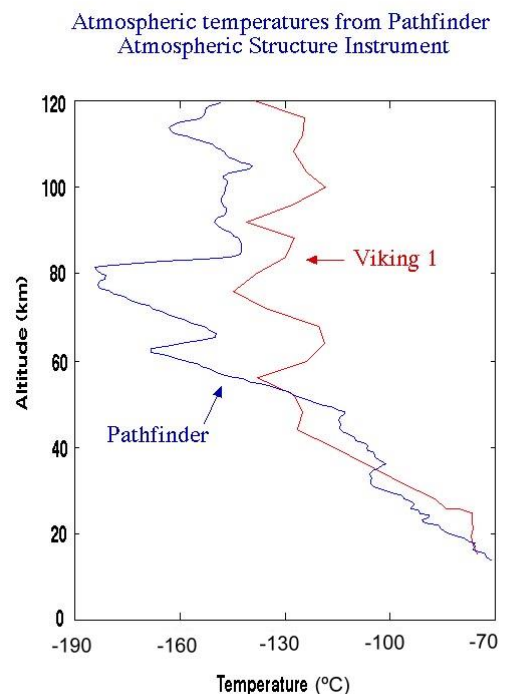


Figura 21: Registro de las temperaturas del aire durante el descenso de la "Mars Pathfinder" y de la "Viking 1" hasta el suelo marciano. (Wikimedia Commons)

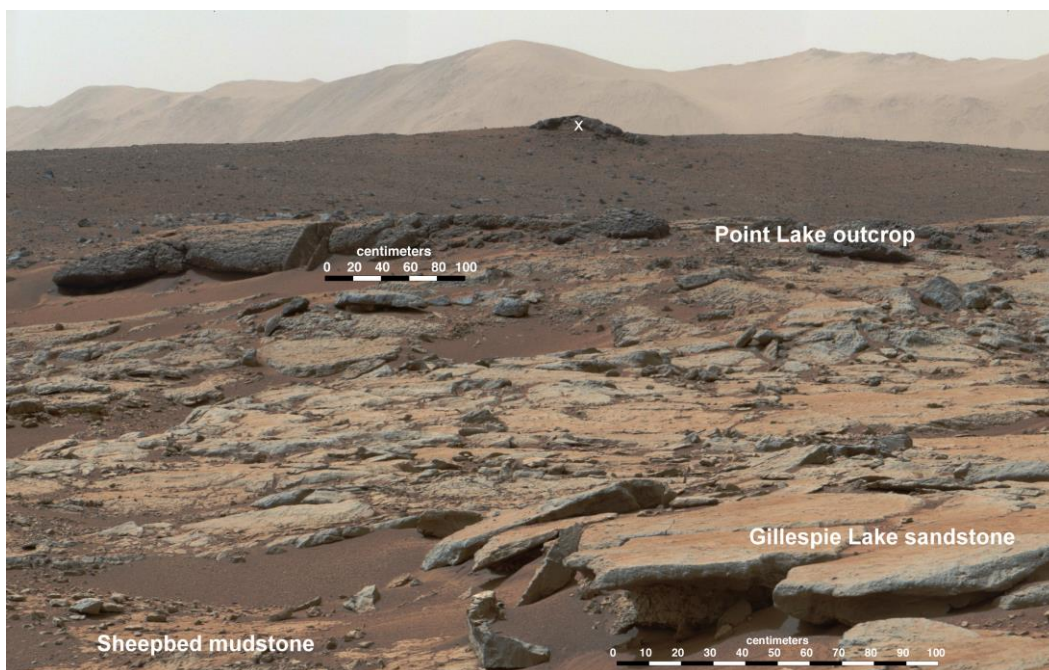
Marte es el único planeta del Sistema Solar que nos permite ver los detalles de su superficie desde la Tierra (en unos lo impide su distancia y en otros sus nubes). A diferencia de Venus, cuya perpetua capa de nubes oculta cualquier detalle de su superficie, Marte posee una atmósfera mucho más tenue, como la de nuestra estratosfera superior, con grandes diferencias de presión entre lugares altos (0,0003 atm) y valles profundos (0,01 atm).

La atmósfera de Marte está constituida principalmente por  $\text{CO}_2$  (95,3%),  $\text{N}_2$  (2,7%), Ar (1,7%), cantidades menores de  $\text{H}_2\text{O}$ , CO,  $\text{O}_2$ , y vestigios de otros gases nobles como el neón, kriptón y xenón. En función de la estación del año marciano, hora del día y latitud, varía la concentración



de vapor de agua en la atmósfera, aunque nunca dan lugar a nubes de cierta consistencia como pudieran ser los cúmulos o estratocúmulos terrestres. La atmósfera más seca se ha detectado en las zonas polares durante el invierno, y la más húmeda también en zonas polares pero en verano. Las frecuentes tormentas de polvo reducen el contenido de vapor de agua atmosférico mientras tienen lugar.

En las primeras etapas de su formación, Marte poseía una envoltura gaseosa mucho mayor, que fue paulatinamente desapareciendo, y con ella el agua líquida superficial. De ahí que Marte no tenga océanos, ni lagos, ni corrientes de agua, aunque se han encontrado indicios muy claros de que en un tiempo pasado hubo líquidos, seguramente agua, corriendo por su superficie en forma de torrentes, ríos o lagos (Figura 22). Los datos ofrecidos por los últimos vehículos de exploración de la NASA enviados a la superficie marciana, como el Curiosity, confirman que en el subsuelo existen grandes depósitos de permafrots (agua helada mezclada con tierra y rocas), sobre todo cerca del polo sur, que pudieran ser los restos de lo que fueron mares, lagos y ríos de hace miles de millones de años, cuando la atmósfera era presumiblemente más densa (Figura 23).



*Figura 22: Depósitos sedimentarios en el cráter Gale. Fotografía tomada por el rover "Curiosity" de la NASA el 14 de febrero del 2013. Crédito: NASA/JPL-Caltech/MSSS*



*Figura 23: Fotografía tomada por el rover "Curiosity" el 8 de septiembre de 2016 en la región de Murray-Battles, en la parte inferior del Monte Sharp, donde se aprecia un afloramiento con rocas finamente estratificadas.*

*Crédito: NASA/JPL-Caltech/MSSS*

Contrariamente al proceso de calentamiento que ocurre en Venus, la tenue atmósfera de Marte no permite una acumulación de calor suficiente como para evitar el progresivo enfriamiento nocturno y la formación de hielo en los polos (hielo "seco" de CO<sub>2</sub>, sobre todo), estimándose en tan solo 5 °C el aumento en la temperatura media debido al efecto invernadero. La pequeña cantidad de oxígeno presente en la atmósfera imposibilita la formación de una verdadera capa de ozono, lo que facilita la disociación fotoquímica del CO<sub>2</sub>.

El agua se disocia en hidrógeno atómico y en radical hidroxilo debido a los rayos UV solares, productos muy reactivos que pueden catalizar la recombinación del CO y del oxígeno para volver a dar CO<sub>2</sub>, lo que mantiene la proporción de este compuesto en valores tan altos y constantes. Un fenómeno peculiar, exclusivo de Marte, es el flujo de condensación del CO<sub>2</sub> desde el polo norte que es calentado por los rayos solares haciendo que el hielo se sublime, hacia el polo sur, donde se deposita en forma de hielo (se congela a -57 °C). Las reacciones entre el hidrógeno atómico y el oxígeno molecular llegan a formar peróxido de hidrógeno (agua oxigenada - H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), poderoso oxidante que juega un importante papel en la oxidación de los minerales de la superficie, dando a Marte ese tinte rojo tan característico.

A pesar de la pequeña cantidad de vapor de agua, no es extraña la presencia de nubes en el cielo de Marte. Se alcanza la saturación con mucha facilidad, dando lugar a diversos tipos de nubes bastantes parecidas a las existentes en la Tierra. Las nubes de Marte son de tres tipos: amarillentas, blanquecinas y azuladas. Las primeras, que son posiblemente las más llamativas, formadas por polvo superficial levantado por el viento, tiñen de color anaranjado la atmósfera y las propias nubes. Están asociadas a las frecuentes e impetuosas tempestades de arena, tormentas de polvo tan habituales como únicas entre todos los cuerpos del Sistema Solar, y que ya se conocían desde 1877, ya que pueden llegar a cubrir casi por completo el planeta, dándole esa tonalidad anaranjada cuando se observan a través del telescopio. En segundo lugar, las nubes blancas, que se observan siempre en lugares próximos al "terminador" (línea que separa la zona iluminada de la oscura), es decir, al amanecer y al atardecer, dando la sensación de desaparecer con el calentamiento de la atmósfera en el transcurso del día. Al igual que las amarillentas, pueden verse desde la Tierra con telescopios de mediana potencia. En tercer lugar, las nubes azuladas, que siguen el mismo patrón de conducta que las blancas, y que también se forman en las zonas polares.

Por su forma o evolución podemos encontrar distintos tipos de nubes, como las nubes convectivas blanquecinas en forma de pompa, que se forman por calentamiento de la superficie en las altiplanicies ecuatoriales a partir del mediodía marciano, versiones reducidas y menos consistentes de nuestros conocidos cúmulos, y que se encuentran a una altitud de entre 5 y 8 km (Figura 24). A pesar del bajo contenido de agua en la atmósfera marciana, también se forman nubes blanquecinas de vapor de agua de origen orográfico, cuando las corrientes atmosféricas tienen que sortear los numerosos obstáculos elevados de la geografía marciana (una elevada cadena montañosa, por ejemplo). Al ascender, el gas se enfría bruscamente y el vapor de agua se condensa, formando nubes aisladas, delgadas y uniformes, parecidas a los estratos terrestres. Una variedad de estas nubes orográficas se producen cuando existen fuertes vientos y encuentran un gran obstáculo en su camino, al rebasarlo se produce un movimiento del aire en forma de onda que da lugar a las llamadas "nubes ondulatorias", siempre que se den las condiciones de humedad y temperatura necesarias, con cierto parecido a los altocúmulos lenticulares que vemos en la Tierra, y que se encuentran en las proximidades de las elevadas cumbres, algunas de las cuales ostentan el récord de altura entre todas las montañas de todos los planetas y satélites del Sistema Solar, como el Monte Olimpo, la mayor elevación del Sistema Solar, con un diámetro de 600 kilómetros y una cima que se eleva 24 000 metros sobre su base.

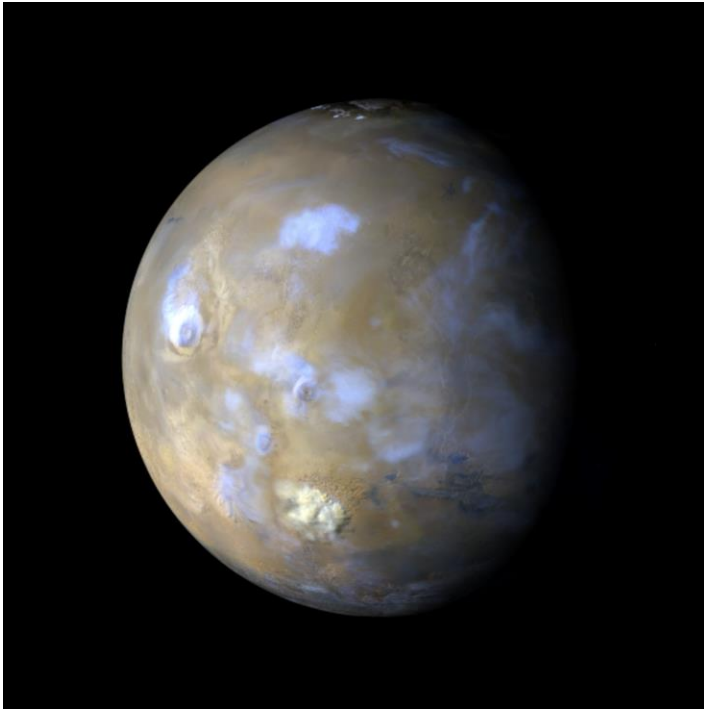


Figura 24: Fotografía de Marte en la que pueden apreciarse nubes de diversos tipos  
Crédito: NASA/JPL-Caltech/MSSS  
-Malin Space Science Systems-

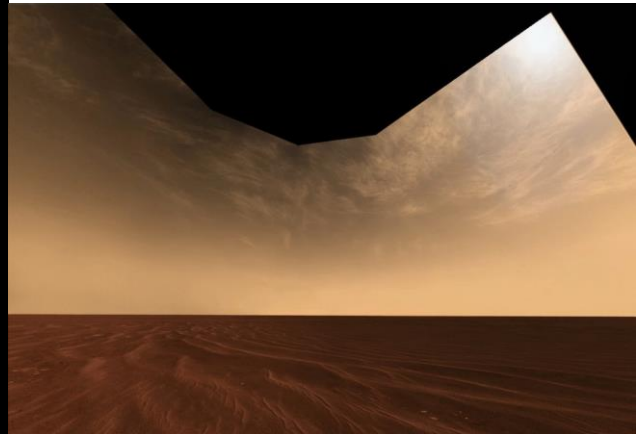


Figura 25: Fotografía tomada por el rover "Opportunity" en la que pueden apreciarse nubes tipo cirros sobre una amplia extensión de dunas. También puede notarse el oscurecimiento del cielo hacia el cenit.  
Crédito: NASA/JPL-Caltech

Las "nubes matinales", o nieblas matinales, parecen estar en equilibrio con la capa de escarcha de agua que cubre la superficie del planeta en extensas regiones durante las frías noches, y que con el calentamiento de los primeros rayos del sol se evapora (sublima), condensándose en el seno de la atmósfera y dando lugar a la niebla. Por la noche, cuando descienden las temperaturas de nuevo hasta valores de  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , aparece de nuevo la blanquecina escarcha sobre la superficie.

En épocas invernales o de finales de otoño, en las regiones polares pueden registrarse temperaturas por debajo de  $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que facilita la formación de unas nubes blancas (Figura 25), que pueden estar compuestas por cristales de hielo seco ( $\text{CO}_2$ ), probablemente con aspecto parecido a los cirros terrestres. Estas nubes desaparecen durante la primavera marciana (Figuras 26 y 27).



Figura 26: Nubes captadas por el rover "Curiosity" de la NASA en Marte, el día 19/03/2021  
Crédito: NASA/JPL-Caltech/MSSS

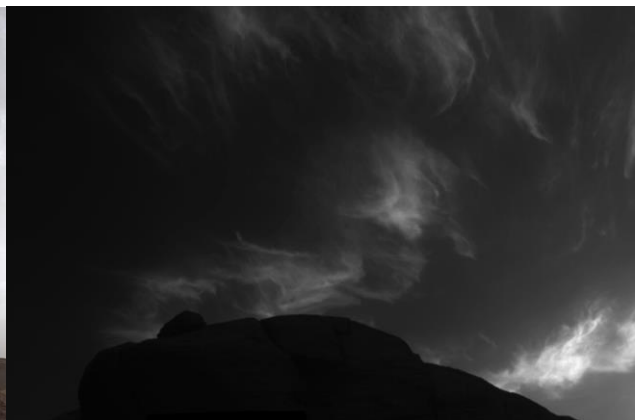
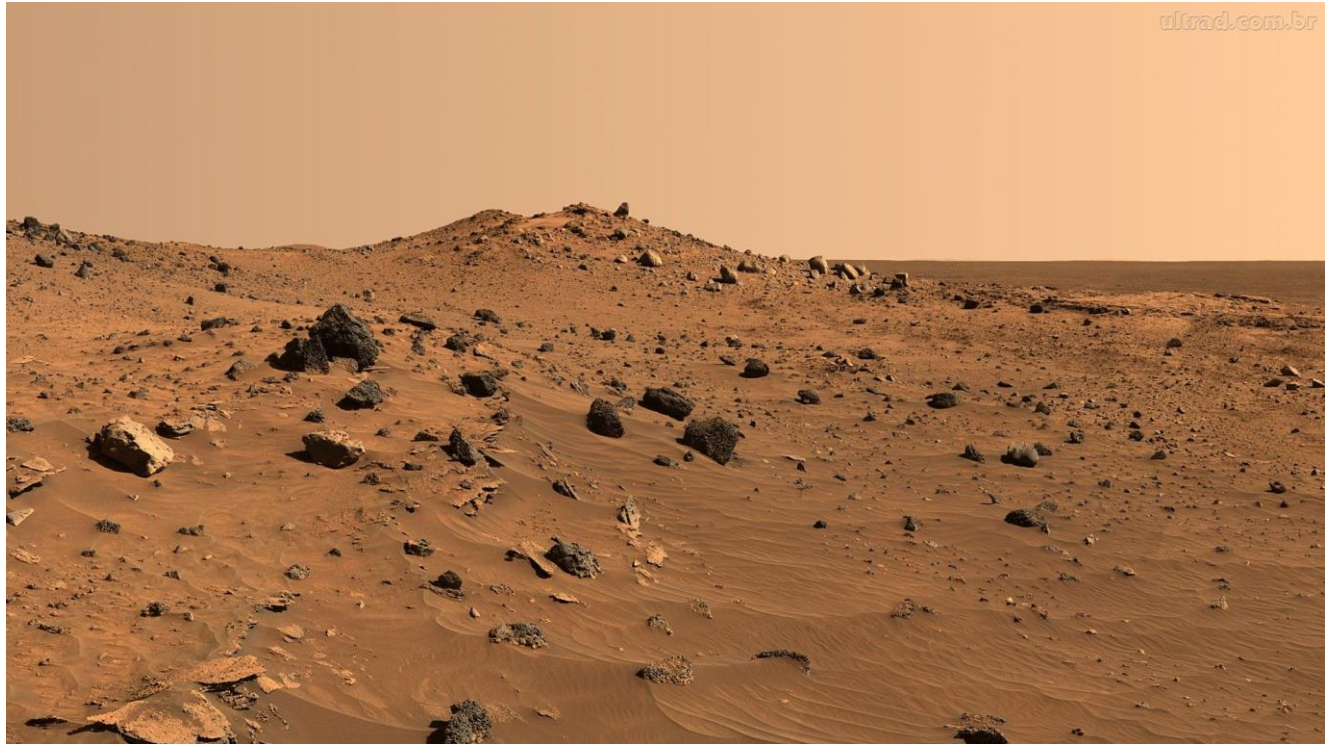


Figura 27: Nubes captadas por el rover "Curiosity" de la NASA en Marte  
Crédito: NASA/JPL-Caltech/MSSS



A pesar de la existencia de nubes, en Marte no llueve nunca, pues las anteriormente mencionadas condiciones de presión y temperatura no lo hacen posible. En septiembre de 2008 la sonda de la NASA "**Phoenix Mars Lander**" tomó fotografías de lo más parecido que podemos encontrar en Marte a una 'nevada'. Los copos de nieve se evaporaban antes de alcanzar la superficie, un fenómeno que bajo determinadas condiciones también se observa en la Tierra y se conoce como "virga".

En Marte, los fenómenos erosivos están provocados por el viento y por las marcadas diferencias de temperaturas debidas a su liviana atmósfera. Esta erosión pulveriza las rocas cristalinas de la superficie, dando lugar a enormes campos de dunas y a una capa de polvillo que recubre la totalidad del planeta (Figura 28).



*Figura 28: Fotografía desde la superficie de Marte realizada por la sonda "Mars Pathfinder" de la NASA  
Crédito: NASA/JPL-Caltech*

Aparecen diferenciados dos regímenes de vientos, el de invierno en latitudes medias, en el que a semejanza de lo que ocurre en la Tierra se suceden vientos dominantes del oeste y corrientes en chorro a gran altura, y el del verano ecuatorial, sometido únicamente al lento suceder de las largas estaciones marcianas, cuyo "motor", lo mismo que ocurre en la Tierra, es la variación diurna de temperaturas. El efecto combinado del calor-frío y la topografía local, es la clave de los vientos en las zonas ecuatoriales, en donde los vientos dominantes son análogos a las brisas de montaña de la Tierra. El ciclo diario de calentamiento de la superficie, conlleva una notable oscilación en el régimen de vientos en la atmósfera (efecto de marea), mucho más intenso que en nuestro planeta.

Cerca de la superficie el viento suele ser más que apreciable, sopla con una velocidad media aproximada de 40 km/h. aunque debido a la baja presión atmosférica en superficie, o mejor dicho, a la baja densidad del aire, no levanta partículas sólidas de polvo o arena del suelo, para lo que se precisan vientos de más de 100 km/h. No obstante, una vez suspendidas en el aire pueden ya permanecer como tormentas o grandes tempestades de polvo durante largos periodos de tiempo, meses incluso, debido al efecto combinado de la baja gravedad en superficie ( $3,71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ )

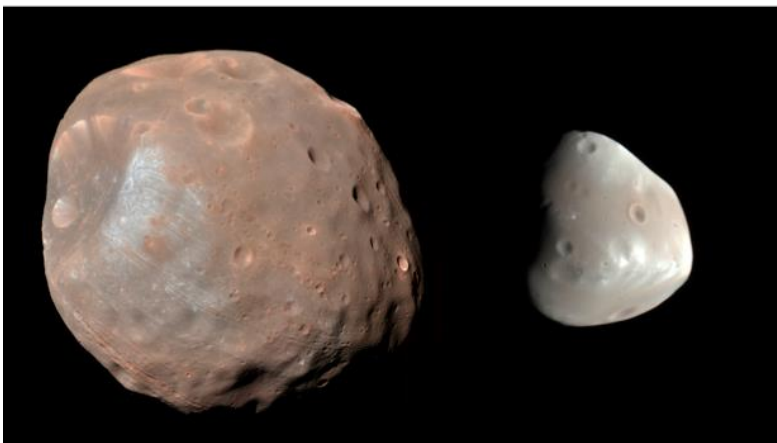
y de su tenue atmósfera. Aún así, a altitudes mayores, de entre 50 y 100 km, los efectos de marea son mucho más intensos, sirviendo de "mezclador" eficaz de los componentes atmosféricos.

En invierno, cerca de los polos, se producen fuertes vientos, con intensidad superior a 300 km/h, que suelen originar esas espesas tormentas de polvo locales que frecuentemente se esparcen por todo el planeta, dando lugar a violentas tempestades globales que cubren a Marte de un opaco velo amarillo-rosáceo. También en invierno-otoño, los casquetes aumentan su tamaño y las regiones oscuras palidecen.

El paisaje típico de Marte nos muestra impresionantes cañones, elevados volcanes extinguidos, cráteres semejantes a los de la Luna y continuas tormentas de arena que nublarán su rojiza superficie pedregosa y escarchada. El cielo presenta un color asalmonado, más o menos intenso dependiendo de la cantidad de polvo en suspensión, que deja ver el Sol con un tamaño casi la mitad del que muestra desde la Tierra, siempre que alguna nube o tormenta de polvo no lo impida.

El cielo de Marte debe mostrar un espectáculo nocturno extraordinario, pues su suave atmósfera permitirá contemplar el sistema Tierra-Luna, Venus y Mercurio con particular claridad y colorido, al igual que Júpiter con sus grandes satélites galileanos y Saturno con sus extraordinarios anillos.

Sus lunas "Fobos" (*Temor*) y "Deimos" (*Pánico*), se verán como un pequeño objeto irregular de un tamaño 1/6 del que presenta nuestra Luna (Fobos), desplazándose rápidamente de oeste a este, siendo la más cercana al planeta; y como una estrella muy brillante (Deimos), saliendo por el este y poniéndose por el oeste, como el resto del cielo estrellado, y con poco movimiento aparente respecto al fondo de estrellas "fijas". Debido a sus parámetros orbitales, parecen moverse en sentidos contrarios en el cielo marciano, pero ambos satélites giran en el mismo sentido "directo" (contrario al de las agujas de un reloj) visto desde el polo norte de Marte, lo que ocurre es que Fobos lo hace por debajo de una órbita sincrónica y "adelanta" al planeta en su movimiento de rotación. A causa de su pequeño tamaño ambos satélites tienen una forma irregular (Fobos: 27 km x 21 km x 19 km), y (Deimos: 15 km x 12 km x 10 km) que las asemeja a dos grandes "patatas" cósmicas (Figura 29).



	<b>Fobos</b>	<b>Deimos</b>
Tamaño	27 x 21 x 19 km	15 x 12 x 10 km
Periodo Orbital	7,66 horas	30,3 horas
Densidad	1,9 g/cm <sup>3</sup>	1,5 g/cm <sup>3</sup>
Semieje mayor	9,377 km (2.8 R <sub>Marte</sub> )	23,460 km (~7 R <sub>Marte</sub> )
Gravedad	2-8 x 10 <sup>-3</sup> m/s <sup>2</sup>	2 x 10 <sup>-3</sup> m/s <sup>2</sup>

Figura 29: Características de los satélites de Marte: Fobos y Deimos  
Crédito: Johns Hopkins University (Applied Physics Laboratory)

Analizando con más detalle la cantidad porcentual de los gases atmosféricos en Marte, comprobamos que su atmósfera está compuesta casi en su totalidad por CO<sub>2</sub> con pequeñas cantidades de N<sub>2</sub>, Ar, H<sub>2</sub>O, CO y O<sub>2</sub>. Como sabemos, El CO<sub>2</sub> es un gas de efecto invernadero, pero en el caso de Marte, forma una capa tan tenue que apenas afecta a la temperatura global del planeta.

Las sondas norteamericanas gemelas de la NASA "Viking 1" y "Viking 2" fueron las primeras que consiguieron posarse sobre la superficie de Marte, confirmando que la atmósfera marciana es 100 veces menos densa que la terrestre, y evidenciando que la cantidad neta de CO<sub>2</sub> en su atmósfera es muy baja, e insuficiente para producir un efecto invernadero apreciable. Podemos convencernos de que es así, recurriendo a la Ley de Stefan-Boltzmann para estimar la "temperatura efectiva" de Marte, que arroja un valor de 210,1 K (equivalente a -63 °C). Como vemos, al compararla con la temperatura media real, que es de unos -55 °C, el efecto invernadero es insignificante, subiendo poco la temperatura media global del planeta.

En el caso de la Tierra, la atmósfera y los océanos actúan como agentes reguladores de la temperatura, atenuando las diferencias entre día y noche, y llevando además parte del calor de unas zonas a otras. En Marte, la ausencia de océanos y la menor densidad de su atmósfera hacen que la temperatura varíe de forma más acusada con la latitud, así como con la hora del día. Las temperaturas máximas diarias se dan un par de horas antes de la puesta de Sol, mientras que las mínimas se observan justo antes del amanecer, un régimen térmico similar al que ocurre en los desiertos de la Tierra. Por ejemplo, durante el verano en la zona ecuatorial se pueden sobrepasar los 20 °C durante el día, pero durante la noche pueden desplomarse hasta los -80 °C.

Como ocurre en la Tierra, la temperatura desciende con la altitud pero la escasez de oxígeno hace que en Marte no exista una capa de ozono que se encargue de absorber los rayos ultravioletas solares. Junto con la baja temperatura y la ausencia de oxígeno, la radiación ultravioleta que llega directamente al suelo será un factor más a tener en cuenta de cara a una futura colonización humana de Marte.

El hecho de que la cantidad de gas en la atmósfera sea mucho menor que en la Tierra, hace que la presión atmosférica de Marte en superficie sea también unas 100 veces menor que la terrestre. A este respecto, durante las misiones "Viking" en el año 1976, se registró inesperadamente un curioso fenómeno relacionado con la presión sobre la superficie marciana y las alternancias de las estaciones. Varias semanas después de iniciar su programa de toma de muestras y registro de datos sobre la superficie marciana, las sondas de aterrizaje VL ("*Viking Lander*") mostraron un continuado y drástico descenso de la presión atmosférica. No podía tratarse de un fallo de los sensores o de un fenómeno local, porque tanto la VL1 como la VL2 registraron valores consistentes, a pesar de encontrarse en puntos muy distantes entre sí, ¡parecía que parte de la atmósfera estaba desapareciendo!. La explicación era que, debido a la cercanía del invierno en el hemisferio sur, la temperatura en el polo sur era tan baja que grandes cantidades de CO<sub>2</sub> de la atmósfera se estaban depositando en el casquete polar en forma de hielo. El dióxido de carbono se congela a una temperatura de -57 °C, formando lo que se conoce como 'hielo seco'. Con la llegada de la primavera, a comienzos de 1977, el hielo seco se fue evaporando (sublimando) y la presión atmosférica volvió a subir. Al llegar el invierno al hemisferio norte, vuelve a darse el mismo fenómeno, acumulándose el hielo, en este caso, en el polo norte. Así, a lo largo del año, el CO<sub>2</sub> va pasando de un hemisferio a otro, formando depósitos de hielo seco en los casquetes respectivos.

Al hablar de las temperaturas marcianas, inmediatamente y de forma automática tratamos de relacionarlas con lo que conocemos en la Tierra, al fin y al cabo no son temperaturas tan diferentes a las que se dan en nuestro planeta. En el caso de Venus no hay margen para este tipo de consideraciones, queda bien claro lo que significan 460 °C a más de 90 atmósferas de presión en el seno de una atmósfera corrosiva, sobre todo cuando no hay diferencias ni geográficas ni por

latitud, con uniformidad día-noche. Para el caso de la Tierra y sobre todo de Marte, hablar de sensación térmica, en contraposición a una temperatura dada, resulta muy pertinente.

Por ejemplo, cuando salimos a la calle en invierno y tocamos un elemento metálico, nos parece más frío que un palo de madera que esté al lado y a la misma temperatura. La razón es que el metal conduce bien el calor, fluyendo con facilidad entre dicho elemento metálico y nuestro cuerpo. Por el contrario, la madera es aislante y no facilita el flujo de calor entre ambos al tocarlo con la mano. El viento también tiene un efecto notable sobre nuestra percepción térmica al evaporar la humedad de la piel (en mayor o menor grado dependiendo de la humedad relativa del aire), proceso que hace perder calor al cuerpo, aumentando la sensación de frío.

En Meteorología se tienen en cuenta todos estos factores para estimar la denominada "sensación térmica". Aplicando esas mismas técnicas, podría calcularse aproximadamente la sensación térmica que experimentaríamos al estar sometidos a una cierta temperatura en la superficie marciana, dadas las condiciones atmosféricas de dicha superficie.

Los resultados son sorprendentes. Como primer elemento a tener en cuenta, el calor escapará con más dificultad de nuestro cuerpo y la sensación de frío será menor, ya que la atmósfera de Marte es mucho más tenue que la nuestra. Por ejemplo, en el punto de aterrizaje de la sonda Pathfinder de la NASA, situado a una latitud de 48° N, la temperatura media diurna fue de -14 °C, y teniendo en cuenta las condiciones del viento en este punto, produciría una sensación térmica equivalente a la que tendríamos en la Tierra a una temperatura ambiente de 1 °C.

En algunas zonas de latitudes medias de la Tierra, durante los meses de invierno, las condiciones de temperatura y viento producen una sensación térmica inferior a la que se sentiría en latitudes tropicales de Marte, de forma que entre las adversidades a que se tendrán que enfrentar los futuros colonos humanos en Marte no estará el frío insoportable.

Respecto al color del cielo visto desde la superficie, fundamentalmente es una consecuencia de la dispersión de la luz solar por las moléculas del aire. Esta dispersión es más eficiente para las longitudes de onda cortas (azules), de ahí que sea ese color el dominante de nuestro cielo. Para una atmósfera delgada como la de Marte, esta dispersión debería de ser menos probable que en la Tierra, por lo que podría esperarse un cielo más oscuro que el nuestro, tal vez en un tono azulado oscuro o púrpura.

Al recibir las primeras fotografías de las sondas "Viking" desde la superficie marciana, se constató ese cielo azul parecido al nuestro... sin embargo, ese color estuvo motivado por un error de calibración de los instrumentos, que una vez subsanado mostraron la verdadera imagen en color del cielo en Marte, que era menos oscuro de lo que se pensaba y con un tono rosado-ocre que le otorgaban las partículas de polvo y arena en suspensión, levantadas por el viento durante las tormentas de arena, y que permanecen en la atmósfera de forma permanente (Figura 30).



*Figura 30: Fotografía tomada por el rover "Curiosity" cerca del Monte Sharp  
Crédito: NASA/JPL-Caltech/MSSS*



Hubo que esperar algunos años, hasta el 2005, para observar claramente una puesta de sol marciana. Fue el robot para la exploración de Marte de la NASA "Spirit" el que envió sorprendentes imágenes de calidad del ocaso solar marciano, mostrando un disco solar, más pequeño (2/3) que el que podemos ver desde la Tierra, aproximándose al horizonte oeste, con un cielo claramente azulado (Figura 31).



*Figura 31: Atardecer en el cráter Gusev de Marte, fotografiado en el año 2005 por el robot explorador "Spirit" de la NASA.*

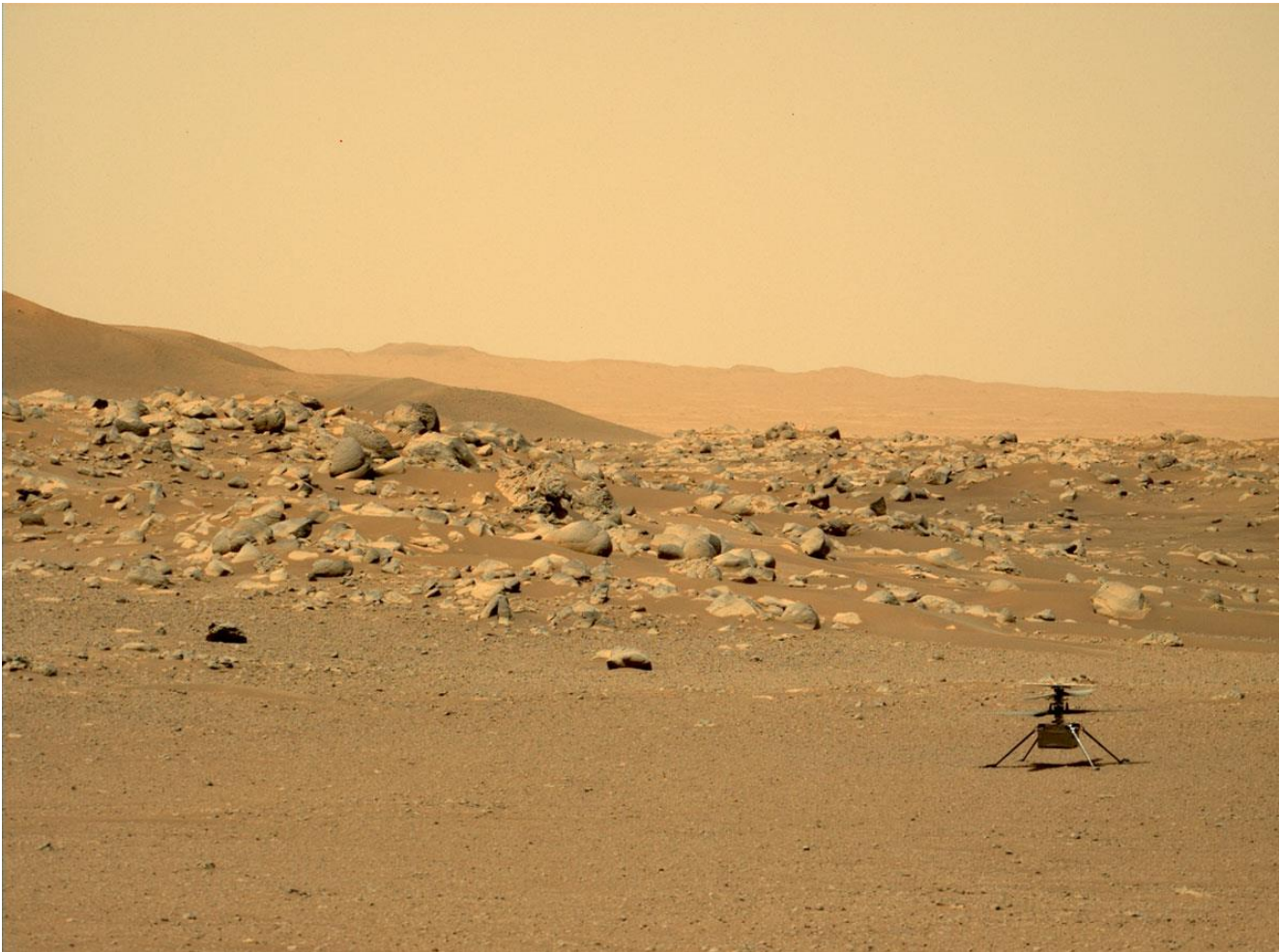
*Crédito: NASA/JPL-Caltech/Texas A&M/Cornell*

Los colores que presenta el cielo, tanto en la Tierra como en Marte, dependen de varios factores, como la composición de la atmósfera (gases), la presencia de aerosoles, el espesor de la atmósfera que tiene que recorrer la luz solar, etc... En el caso terrestre, el tamaño de las moléculas de los gases atmosféricos y del grado de dispersión de la luz del Sol que generan, junto con el aumento del grosor atmosférico a atravesar cuando el Sol está cerca del horizonte, hacen que nuestro cielo se muestre azul, y que los tonos rojizos dominen durante los ortos y ocasos solares. Para Marte, la diferente composición atmosférica hace que el tamaño de las moléculas de sus gases predominantes generen una dispersión diferente de la luz solar, lo que unido a su poca densidad y a la fuerte presencia de polvo de óxidos de hierro en suspensión, su cielo se ve anaranjado, salvo cuando el Sol sale o se pone, momentos en los cuales el cielo toma un tono azulado alrededor del Sol más o menos marcado según su distancia al horizonte, efecto causado precisamente por las mismas razones de atmósfera muy liviana, tamaño de las moléculas de los gases dominantes y abundante presencia de aerosoles. El resultado comparativo es curioso, nuestro planeta, que llamamos "planeta azul", tiene ocasos rojos, y Marte, que llamamos "planeta rojo", nos



muestra sus atardeceres azules... El Universo nos muestra constantemente contrastes asombrosos.

La historia de la exploración espacial de Marte podemos encuadrarla en la carrera espacial que las dos grandes potencias mundiales iniciaron tras la segunda guerra mundial. En ese ambiente competitivo los inicios por ambas partes estuvieron marcados por muchos intentos fallidos y fracasos de los que fueron aprendiendo para conseguir en pocos años llegar con éxito al planeta, explorarlo desde naves en órbita y desde vehículos en superficie, tanto estáticos como móviles, incluso enviando ingenios voladores que están ofreciendo un resultado excepcionalmente bueno, como el helicóptero marciano "Ingenuity" (Figura 32).



*Figura 32: Imagen del "Ingenuity Mars Helicopter" tomada el día 15 de junio de 2021 por el rover "Perseverance" (Crédito: NASA/JPL-Caltech)*

En la década de los años 60 del pasado siglo, la U.R.S.S. envió a Marte hasta nueve sondas dentro de su programa "Mars", aunque ninguna de ellas consiguió culminar su misión con éxito. Por su parte la NASA puso en marcha el programa "Mariner" en 1965 con el objetivo de mandar al planeta rojo parejas de sondas espaciales automáticas que pudieran realizar medidas al aproximarse al mismo. Aunque algunas de ellas no tuvieron éxito, quizá el mayor logro de este programa fue confirmar de forma taxativa la inexistencia de los canales de Schiaparelli y Lowell, que no aparecían por ningún lado en las fotografías enviadas por las sondas, sobre todo en las de la "Mariner 9" que una vez situada en órbita marciana fotografió toda la superficie del planeta identificando accidentes geográficos, como lechos fluviales secos, volcanes inactivos, cañones, montañas, valles y cráteres de impacto.

A pesar de los iniciales fracasos soviéticos, fueron los primeros en mandar una sonda a la superficie marciana ("Mars 3", en el año 1971), aunque dejó de emitir a los pocos segundos de funcionamiento. Unos años después, en 1976, la NASA puso en marcha su programa "Viking" enviando a Marte dos vehículos espaciales, cada uno de los cuales dejaría en órbita un módulo orbital mientras desacoplaría otro módulo de descenso que se posaría en la superficie para iniciar sus medidas y registros. "Viking 1" y "Viking 2" estuvieron operativas hasta 1982 y 1980 respectivamente, transmitiendo información de gran valor científico, medidas meteorológicas y fotografías en color de gran calidad.

A los programas de exploración de Marte mencionados les sucedieron otros con mayor o menor fortuna. Sin duda, el que marcó el comienzo de la exploración de la superficie marciana mediante vehículos móviles (rover), fue la misión norteamericana "Mars Pathfinder", lanzada a finales del año 1996 y que incluía el pequeño rover "Sojourner". Pocos años después tomarían el relevo los vehículos gemelos "Spirit" y "Opportunity", más grandes que el anterior y mejor equipados. Exploraron dos lugares muy separados uno del otro y diferentes, aunque ambos recopilaron abundantes pruebas de la existencia de agua superficial (ríos, lagos...) en el pasado de Marte. A finales del año 2011 se lanzó al espacio la nave "Mars Science Laboratory" (MSL), misión espacial de la NASA que incorporaba el rover de exploración marciana "Curiosity", el mayor, más completo y complejo de los enviados hasta ese momento fuera de la Tierra. Es como un coche SUV mediano, con 900 kg de peso (en la Tierra) y cargado con el más sofisticado y complejo laboratorio autónomo, capaz de desplazarse automáticamente de forma segura por la superficie marciana (Figura 33). La última misión de exploración marciana de la NASA, llegó a la superficie del planeta el 18 de febrero del año 2021, aterrizando en el cráter "Jezero", zona de "Syrtis Major". Denominada "Mars 2020" y compuesta por el rover "Perseverance", que es incluso algo mayor que el "Curiosity", y el helicóptero "Ingenuity". Es la más compleja y ambiciosa misión de exploración del planeta rojo hasta el momento.



*Figura 33: Fotografía de las zonas más altas del Monte Sharp, tomada el 9 de septiembre de 2015 por el rover "Curiosity" de la NASA. A unos 3 km del rover se ven montículos de minerales de óxido de hierro y por detrás minerales arcillosos.  
Crédito: NASA/JPL-Caltech*



## VENUS, LA TIERRA Y MARTE. MISMO ORIGEN, DISTINTA EVOLUCION

*"¡No hay naciones! Solo hay Humanidad, y si no llegamos a entender eso pronto, no habrá naciones, porque no habrá humanidad"*

**Isaac Asimov** (1920-1992), profesor de bioquímica, divulgador científico y escritor de ciencia ficción

Las teorías astrofísicas con mayor consenso entre la comunidad científica sobre la formación de estrellas y planetas, señalan un origen común para los planetas y satélites de nuestro Sistema Solar. Una enorme nube de gas y polvo interestelar, con material expulsado durante la explosión de alguna estrella moribunda anterior, deambulaba por uno de los brazos de nuestra galaxia (la Vía Láctea), cuando colapsó por su propia gravedad iniciándose el proceso de formación de una estrella en su zona central y de una cohorte de cuerpos menores a su alrededor (Figura 34).

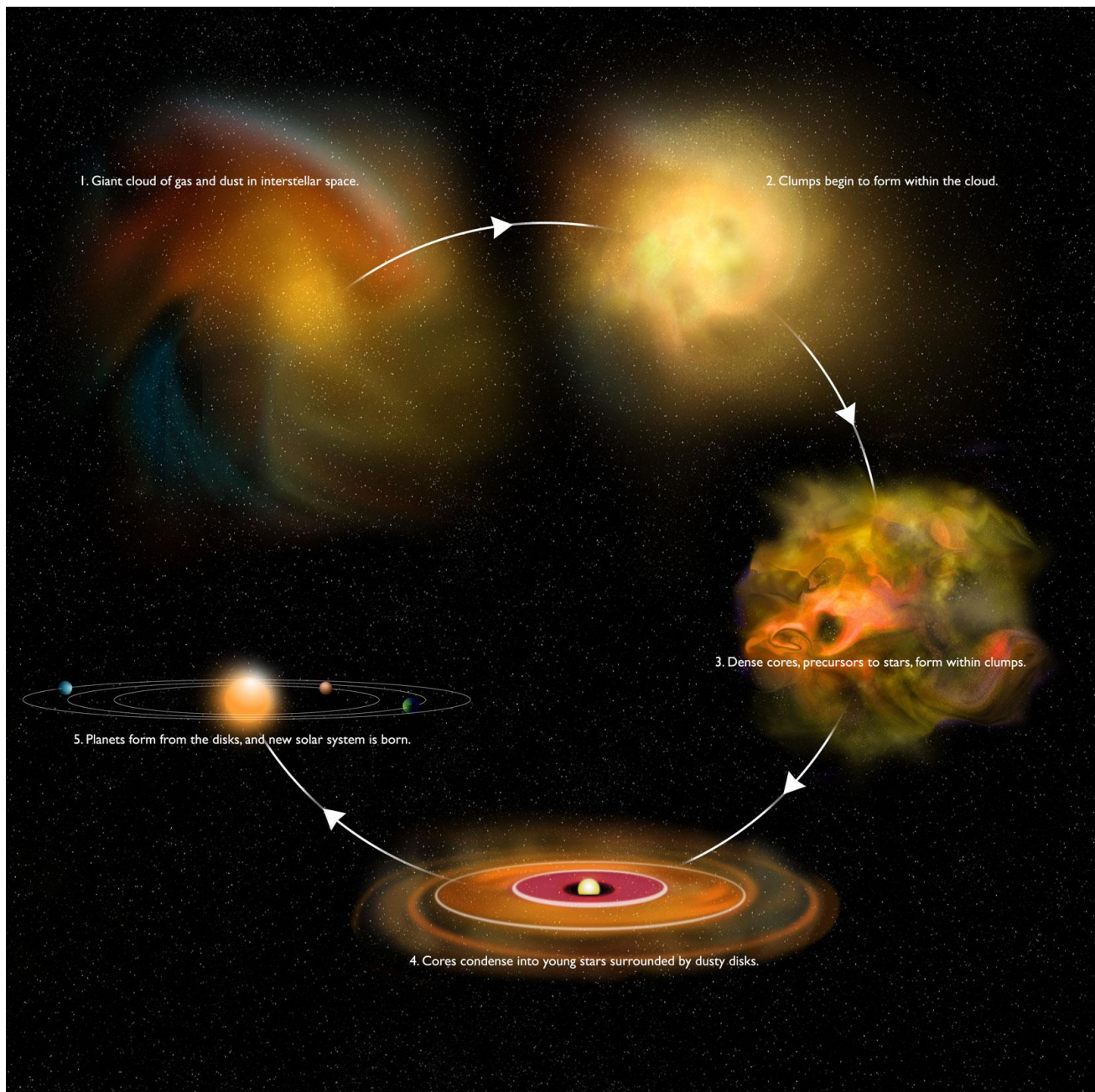
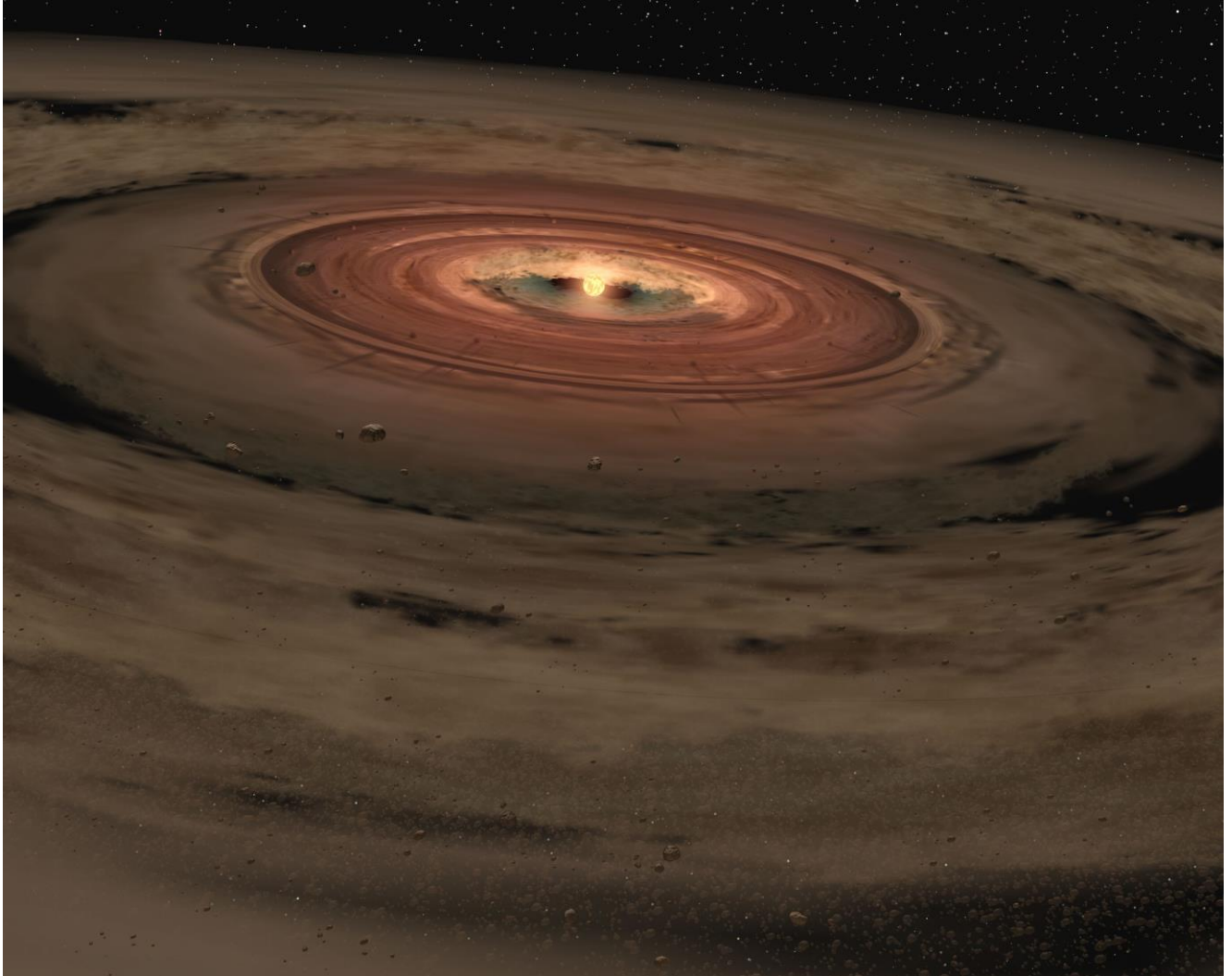


Figura 34: Representación artística de la formación de un sistema planetario  
Créditos: Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF

Dicha nebulosa protosolar, estaba compuesta por los elementos más comunes en el Universo, sobre todo hidrógeno con una cantidad menor de helio, y restos (casi impurezas) de hielos de agua, metano, amoníaco, y partículas sólidas (metales, partículas de roca y polvo). Sin embargo, esas "impurezas" son determinantes en la formación planetaria y aparición de la vida. Debido al colapso gravitacional, en el centro de la nebulosa se va formando un "protosol" de hidrógeno, cada vez más denso, en torno al cual queda un disco "protoplanetario" en rotación con el resto del material original de la nebulosa que más tarde dará lugar a planetas, satélites, asteroides, y cometas (Figura 35).



*Figura 35: Imagen artística de un disco protoplanetario  
Créditos: NASA*

Cuando el protosol alcanzó la masa suficiente para iniciar reacciones nucleares nació el Sol, inundando de luz y calor a todo el disco protoplanetario que lo rodeaba, quedando en la zona más interior los planetas rocosos y relativamente pequeños (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte), conocidos como planetas "interiores" o "terrestres". En las zonas más exteriores del recién nacido Sistema Solar quedaron los planetas denominados "exteriores", gaseosos y de mayor tamaño (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno). Ambas zonas han quedado separadas por el llamado "cinturón de asteroides" entre las órbitas de Júpiter y Marte, y que pudieron ser los restos de un planeta fallido.

Las dos familias de planetas del Sistema Solar muestran grandes diferencias, cuyo origen está en las diferentes condiciones de las dos zonas en las que se formaron. El Sistema Solar interior es una zona próxima al protosol muy cálida y sometida al "viento solar", lo que evaporó el hielo dejando solamente trozos de polvo y roca que fueron aglutinándose en objetos de algunos kilómetros de tamaño llamados "planetésimos", que posteriormente fueron chocando entre sí hasta formar "protoplanetas". Los cuatro planetas interiores del Sistema Solar se formaron de esta manera a lo largo de varios cientos de millones de años, perdiendo el material gaseoso que tenían, arrastrado por el viento solar del recién nacido Sol, y quedando como cuerpos fundamentalmente rocosos.

Todos estos acontecimientos desde la ignición del protosol, tuvieron lugar hace unos 4600 millones de años. Durante los primeros millones de años, la Tierra era un objeto esférico semifundido, con intensa actividad volcánica y sometido a un constante bombardeo de meteoritos y cometas. En este periodo convulso, inmediatamente posterior al nacimiento de nuestro planeta, realmente no se podía hablar de "clima" en la Tierra. Con la aparición de la atmósfera secundaria, en el "Período Precámbrico", empiezan a aparecer los factores (corrientes marinas, latitud, altitud, y disposición océanos y tierra firme) y elementos (temperatura, humedad, viento, precipitación, nubosidad, presión y evaporación) que condicionan el incipiente "Clima", y por tanto, los orígenes de los sucesivos cambios climáticos.

Las primitivas atmósferas de todos los planetas del Sistema Solar estaban compuestas por los gases más abundantes en la nube protosolar de la que nacieron el Sol y su séquito de planetas, satélites, asteroides y cometas. Esos gases, mayoritariamente ligeros como el hidrógeno, helio, neón, argón, metano, amoníaco, sulfuro de hidrógeno, etc.... quedaron retenidos en los planetas con más masa y más alejados del Sol (planetas exteriores), pero los planetas interiores, menos masivos y situados en una zona del Sistema Solar más cálida, perdieron pronto esa atmósfera primitiva, por el calor, la baja gravedad y el viento solar.

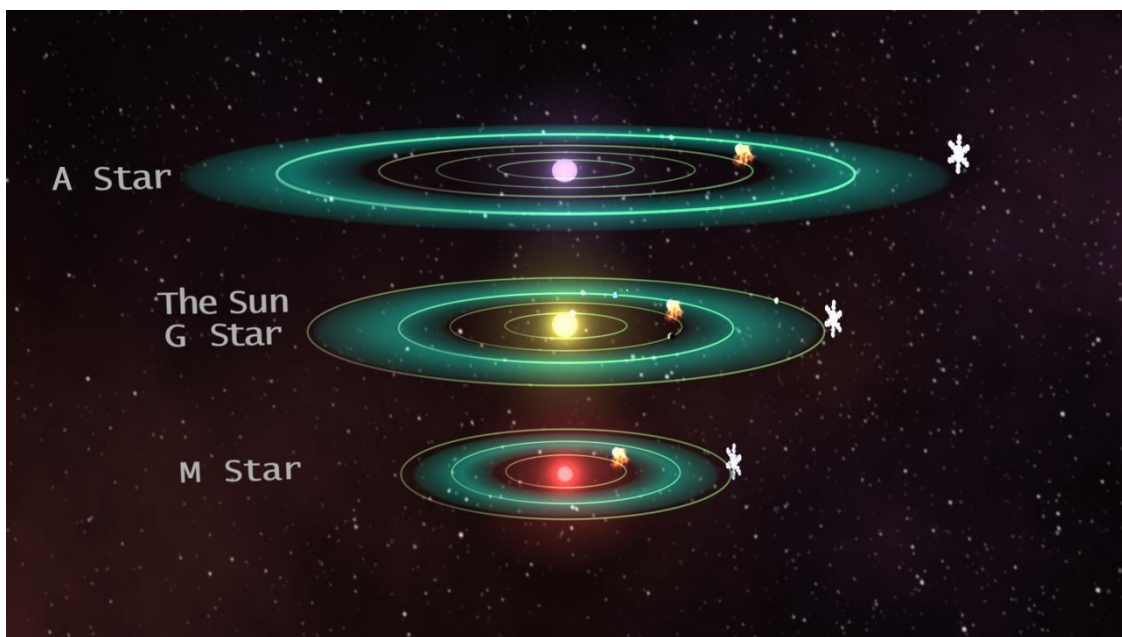
La Tierra, al igual que Venus y Marte, perdió pronto esa ligera atmósfera primitiva, generándose otra posterior por la desgasificación de las capas internas del planeta a través de la actividad volcánica. Esa atmósfera de segunda generación, que se creó hace unos 4000 millones de años, estaba compuesta mayoritariamente por CO<sub>2</sub> y cantidades menores de otros gases como el nitrógeno. La incesante actividad volcánica provocó la emisión de grandes cantidades de gases del interior del planeta, entre ellos vapor de agua, que fueron condensándose en la atmósfera, generando nubes y precipitando en forma líquida sobre la superficie, dando lugar a los primitivos océanos. También se especula con el aporte de agua proveniente de cometas que incrementarían sustancialmente el agua líquida superficial.

En una primera aproximación el clima de los planetas del Sistema Solar depende en buena medida de su distancia al Sol, aunque hay otros factores determinantes, como la existencia o no de atmósfera, tan importantes o más que la propia radiación solar. Todos los planetas interiores del Sistema Solar poseen atmósferas a excepción de Mercurio, que solamente presenta vestigios de gases atrapados del viento solar y también liberados por la corteza del planeta. Un primer dato diferenciador entre las atmósferas de Venus, la Tierra y Marte es la cantidad de gases que contienen, Venus tiene en su atmósfera 100 veces más gas que la Tierra, y ésta a su vez tiene 100 veces más gas que Marte. Respecto a sus composiciones actuales, las atmósferas de los tres planetas están compuestas básicamente por los mismos elementos: **CO<sub>2</sub>** (Venus -> 96,5%, la Tierra -> 0,03% y Marte -> 95,3%), **O<sub>2</sub>** (Venus -> trazas, la Tierra -> 21% y Marte -> 0,13%), y **N<sub>2</sub>** (Venus -> 3,5%, la Tierra -> 78% y Marte -> 2,7%), y cantidades poco significativas de otros gases, lo que se corresponde bien con su origen común.



Llaman la atención las discrepancias porcentuales entre los datos de los gases atmosféricos de la Tierra, y los de sus vecinos planetarios. El CO<sub>2</sub> es el componente mayoritario en las atmósferas de Venus y Marte, mientras que en la Tierra solamente representa el 0,03%, que tiene al nitrógeno como gas predominante con el 78% y al oxígeno en segundo lugar con el 21%. Por el contrario, el N<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub> juegan un papel irrelevante en las atmósferas de Venus y Marte, ¿por qué nuestro planeta no tiene una atmósfera de dióxido de carbono como Marte y Venus? Los océanos terrestres son la principal causa, actúan como eficientes sumideros de dióxido de carbono, que dan lugar a rocas carbonatadas (calizas) en los fondos marinos, y forman parte de conchas y esqueletos de numerosos seres vivos acuáticos. El oxígeno empezó a tener una presencia significativa en la atmósfera hace unos 2500 millones de años, momento en que la actividad fotosintética de las cianobacterias, que habían colonizado las masas de agua líquida, expulsaban sus residuos (oxígeno) masivamente a la atmósfera. Este aporte de oxígeno iba acompañado también por una disminución de CO<sub>2</sub> atmosférico, que utilizaban las microplantas marinas, y dio lugar a la generación de una capa de ozono (O<sub>3</sub>) que impedía la llegada a la superficie de la radiación ultravioleta solar, cuestión fundamental para el desarrollo posterior de otros seres vivos más evolucionados. Entonces, ¿dónde están los océanos de Venus y Marte?

Venus tiene una órbita más cercana al Sol que la de la Tierra, y por tanto recibe más radiación por unidad de superficie. Hace 4000 millones de años, el Sol era un 25% menos brillante que en la actualidad, por lo que Venus estaba completamente en el interior de la zona Goldilocks (o Zona de Habitabilidad) del Sistema Solar, es decir, dentro del rango de distancias a la estrella (Sol) en las que puede encontrarse agua líquida en la superficie del planeta (Figura 36).



*Figura 36: Zonas Habitables (ZH), sombreadas en verde, en sistemas estelares de una estrella caliente (tipo A), mediana (tipo G, como el Sol), y fría (tipo M)  
Créditos: NASA*

El término "Goldilocks" (Ricitos de Oro), extraído del cuento infantil "Ricitos de Oro y los tres osos", da nombre a la zona habitable que rodea a una estrella, ni demasiado fría ni demasiado caliente como para impedir el origen o el mantenimiento de la vida tal y como la conocemos. En el caso del Sistema Solar esta zona se encuentra aproximadamente entre las órbitas de Venus, que está en el "límite caluroso", y la de Marte en el "límite frío" (Figura 37).

## Zona Goldilocks del Sistema Solar (Zona de Habitabilidad)

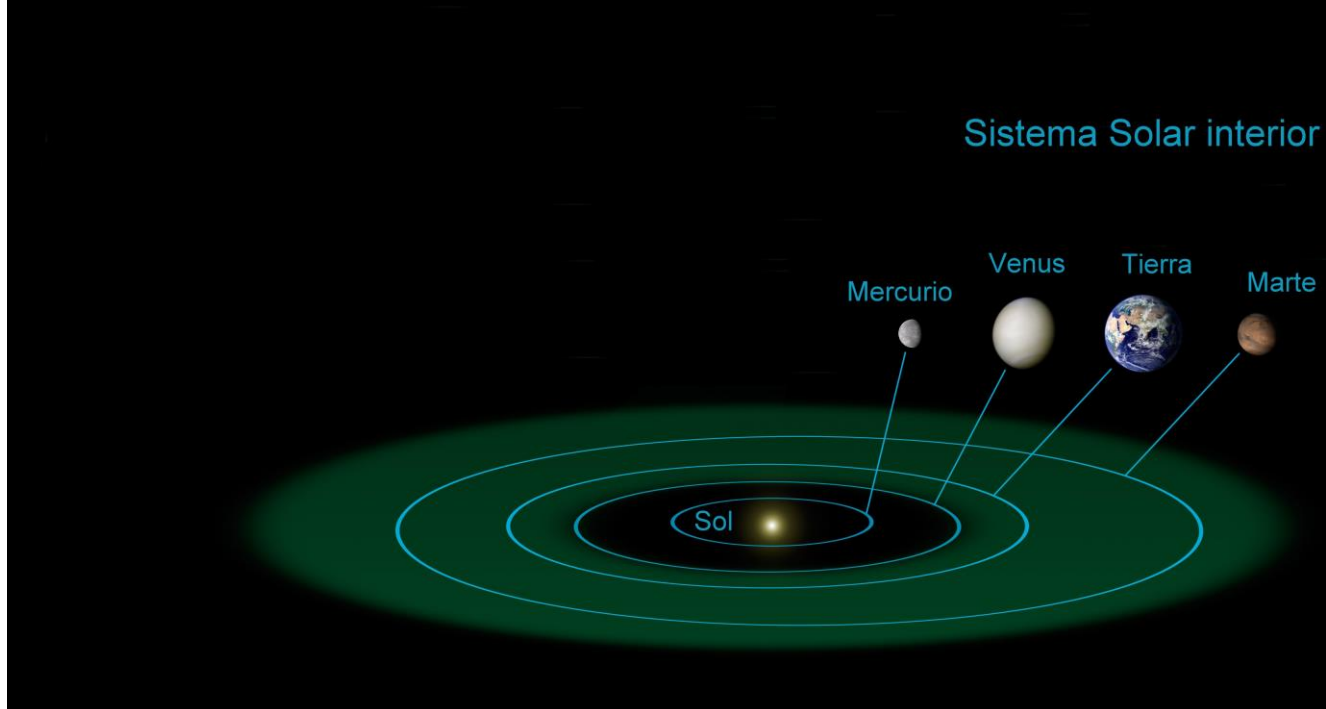


Figura 37: Zona Goldilocks (ZH) del Sistema Solar  
Imagen: Julio Solís García

Fuera de esa zona, por el interior, el agua herviría, y rebasada la zona hacia el exterior estaría congelada. A este respecto hay que precisar que las zonas habitables de los sistemas planetarios solamente contemplan el calor directo de la estrella sin otras consideraciones y referidos a planetas de características similares a las de la Tierra. Aunque es cierto que pueden existir planetas con agua líquida fuera de dicha zona "Goldilocks", como en el caso de algunos grandes satélites de Júpiter y Saturno que tienen océanos de agua líquida bajo sus cortezas de hielo.

Con el paso del tiempo el brillo solar ha ido aumentando, y la Zona de Habitabilidad del Sistema Solar se ha ido desplazando hacia el exterior, hasta dejar fuera al planeta Venus. Su mayor cercanía al Sol tuvo consecuencias dramáticas para su clima, transformando lo que hubiera podido ser un planeta habitable en un mundo totalmente hostil. Las probables aguas superficiales primitivas venusianas se habrían evaporado, cambiando su clima de forma drástica. El vapor de agua en la atmósfera, que además genera un fuerte efecto invernadero, aumentaría aún más la temperatura del planeta, provocando a su vez una mayor evaporación, disparando ese efecto en cadena que ha marcado hasta el momento presente el clima de Venus. Si calculamos su "temperatura efectiva" usando la distancia promedio Venus-Sol (0,723332 UA), y su albedo (0,75), obtenemos un valor de  $-41,46$  °C. Los más de 500 °C de diferencia con su temperatura superficial se deben en buena medida al efecto invernadero, que además del incremento de temperatura tiene otros efectos de gran importancia climática, como el reparto de ese calor extra de manera casi uniforme por todo el planeta, con diferencias de temperatura mínimas con la latitud y el momento del día (día-noche), haciendo constantes esos  $\sim 460$  °C en cualquier lugar de la superficie y a

cualquier hora. Todo ello sitúa a Venus en el primer lugar de la lista de planetas más cálidos del Sistema Solar, más aún que Mercurio.

Hoy sabemos que Venus es seco, en su atmósfera queda poca cantidad de agua, y ese presunto mar original evaporado tuvo que desaparecer de alguna forma. Algunas hipótesis señalan que la radiación ultravioleta del Sol rompió las moléculas de H<sub>2</sub>O, disociándolas en hidrógeno y oxígeno, perdiéndose al espacio, poco a poco, el ligero hidrógeno, mientras que el oxígeno se combinó con otros elementos químicos formando, por ejemplo, el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> muy abundante en su atmósfera.

Según algunos modelos, como el desarrollado a mediados del siglo pasado por el planetólogo Andrew Ingersoll, si la Tierra ocupara ahora la posición de Venus en el Sistema Solar, se desencadenaría un efecto invernadero descontrolado con las consecuencias devastadoras que podemos imaginar, similares a lo ocurrido con Venus hace miles de millones de años. A estos efectos, un aumento brusco en la luminosidad del Sol podría tener unas consecuencias parecidas, al desplazar la Zona de Habitabilidad hacia el exterior del Sistema Solar y dejar a la Tierra en una posición comprometida excesivamente cálida. El Sol experimenta variaciones en su actividad, pero por suerte para nosotros es una estrella muy regular y no parece que hasta dentro de algunos miles de millones de años, cerca ya de su muerte, vaya a alterar esa regularidad que le caracteriza.

Al igual que en el caso de Venus y de la propia Tierra, la atmósfera actual de Marte es una atmósfera secundaria compuesta mayoritariamente por CO<sub>2</sub>, que se formó a partir de la desgasificación de su interior hace unos 4000 millones de años, de lo que dan muestra los numerosos cráteres que cubren buena parte de la superficie del planeta. Esta atmósfera secundaria debió proporcionar el efecto invernadero necesario para que Marte tuviera una temperatura mucho más cálida, además de abundante agua, en forma de un sistema de ríos y lagos y, tal vez, un gran océano cubriendo buena parte del planeta. Existen fuertes indicios de que Marte tuvo en el pasado un clima más benigno que el actual, al igual que en el caso del planeta Venus.

Marte conserva numerosas señales de que hace miles de millones de años, el agua corría por su superficie, tales como accidentes geográficos aparentemente producidos por erosión de agua o hielo, minerales de origen sedimentario o arcilloso, redes y cauces fluviales. Además, se cree que existía una verdadera red fluvial en el subsuelo, que conectaría unas regiones del planeta con otras. Incluso hay indicios de que el planeta experimentó grandes riadas de agua hace unos 3500 millones de años.

¿Dónde ha ido a parar toda esta agua? Recordemos que en el caso de Venus, donde también se cree que abundó el agua en su pasado remoto, la mayor parte se evaporó debido a un efecto invernadero descontrolado y, posteriormente, las moléculas de agua se disociaron debido a la acción de los rayos ultravioleta. Este escenario es improbable en el caso de Marte, ya que, debido a su mayor distancia al Sol, no experimentó este efecto invernadero extremo. Esto ha llevado a pensar a los científicos que Marte conserva buena parte de esta agua, bien en forma de hielo bajo su superficie, o incluso en forma líquida a mayores profundidades.

Esta conclusión ha hecho que uno de los principales objetivos de la exploración de Marte sea la búsqueda de agua. Se sabe que los casquetes polares almacenan grandes cantidades de agua, si bien la mayor parte del tiempo bajo una capa de hielo seco (CO<sub>2</sub>). En el año 2002 la sonda Odissey de la NASA, situada en órbita marciana, detectó a latitudes más bajas (55°) grandes cantidades de hidrógeno justo bajo la superficie, indicativo de la presencia de H<sub>2</sub>O. En el año 2008 la también sonda norteamericana Phoenix llegó a tomar muestras por primera vez de agua en el ártico marciano, además de fotografiar una "nevada". En total, se han identificado más de cinco millones de metros cúbicos de hielo, justo bajo la superficie, suficiente como para cubrir el planeta con un océano de 35 metros de profundidad. Se cree que, a profundidades mayores, podría haber todavía más agua acumulada.

Hasta ahora no se han detectado en su superficie ni corrientes de agua ni depósitos líquidos, debido sobre todo a la baja presión atmosférica, aunque es posible que existan algunos afloramientos de alguna especie de salmuera en determinados lugares y momentos.

A lo largo de este artículo, hemos utilizado continuamente el concepto de "efecto invernadero" como algo negativo para la habitabilidad de un planeta, como claramente lo ha sido en el caso de Venus. Aplicándolo al caso terrestre, para que haya equilibrio entre la energía ganada del Sol y la infrarroja emitida por la Tierra, el promedio global de la temperatura de emisión terrestre debe ser de 18 grados centígrados bajo cero. Pero sabemos que la temperatura media global de la superficie terrestre es de unos 15 grados centígrados (o sea, 33 grados más). Luego no todo el calor infrarrojo que se desprende de la superficie terrestre escapa al espacio exterior. Esto se debe a que ciertos gases presentes de forma natural en la atmósfera actúan como si ésta fuera un invernadero, que deja entrar una buena parte de la radiación solar que calienta las plantas y el aire de su interior, pero permite que escape solo una pequeña porción del calor que desprenden, elevándose así la temperatura interior. De los diversos gases atmosféricos que contribuyen a este "efecto invernadero" los tres principales son, por este orden, el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>). Obviamente, si aumentara la concentración en la atmósfera de alguno de ellos, también lo haría la temperatura global de la superficie terrestre. De igual manera que aumentaría la temperatura de un invernadero si en su techo pusiéramos doble cristal.

En los orígenes del planeta Tierra, 4600 millones de años atrás, el Sol emitía menor radiación que en la actualidad y la temperatura de equilibrio era -41 °C. Podemos imaginarnos, entonces, el extremo frío de esta etapa y que, por tanto, la vida tal y como fue surgiendo después era imposible en aquel entonces. El efecto invernadero en determinados momentos de la historia de nuestro planeta resultó beneficioso y fundamental para el desarrollo de la vida, al igual que en el momento presente un efecto invernadero más intenso en Marte podría cambiar su clima drásticamente y de manera muy favorable para su habitabilidad.

## CONCLUSIONES

*"En nuestra oscuridad, en toda esta inmensidad, no hay ningún indicio de que vendrá ayuda de otra parte para salvarnos a nosotros mismos. Depende de nosotros"*

**Carl Sagan** (1934-1966), astrónomo, astrofísico, cosmólogo, astrobiólogo y divulgador científico

El período que va desde 1850 hasta nuestros días, está particularmente bien documentado en lo que al clima se refiere, pudiendo asegurar que está siendo un período templado y benigno que ha contribuido al crecimiento económico y de población más importante acontecido a lo largo de toda la historia de la humanidad.

En este tiempo ha habido altibajos, y aunque no es un periodo suficientemente largo como para sacar conclusiones, el estudio de la evolución del clima en general indica que entre 1880 y la década de 1940 se produjo un ascenso lento pero continuado de las temperaturas, rompiéndose esa tendencia entre los años 1950-80 del pasado siglo, para posteriormente volver a una fase cálida de subida de temperaturas que nos acompaña hasta hoy. No obstante, el elemento más significativo en los últimos años no es el incremento de temperaturas más o menos constante, sino la variabilidad climática, registrándose valores extremos (tanto por exceso como por defecto) de temperatura, viento, o precipitación, en breves periodos de tiempo.

Esta nueva situación, influye de forma muy clara en las sociedades humanas, que a pesar del grado de desarrollo actual se ven sometidas cada cierto tiempo a situaciones peligrosas, de alto riesgo para la vida, lo que pone cada vez más de manifiesto lo vulnerables que somos a las fluctuaciones del clima.

Sin caer en el alarmismo, lo cierto es que hemos entrado en un nuevo ciclo climático nunca antes conocido por los seres humanos, aunque en alguna medida sí por nuestro planeta, al que debemos de adaptarnos lo mejor posible para evitar una catástrofe humana de enormes dimensiones.

Como hemos visto, el Cambio Climático no es un asunto sencillo. Demasiados factores, todos muy importantes, intervienen en el complejo sistema climático de un planeta, y del nuestro en particular. Además de los elementos comunes de los cambios climáticos conocidos en la historia, el que nos ocupa ahora tiene algunas características que lo hacen único e incomparable con episodios climáticos anteriores, y por tanto resulta extraordinariamente difícil establecer patrones para adelantar los posibles acontecimientos vinculados al cambio climático presente.

Dichos patrones nuevos tienen que ver sobre todo con la actividad humana, tanto en el origen del actual cambio climático, como elemento desencadenante con su actividad social e industrial y sus emisiones a la atmósfera, como también en cuanto elemento que va a sufrir particularmente las consecuencias del cambio que está provocando.

Las infraestructuras humanas repartidas por todo el mundo, y la colonización que se ha llevado a cabo a lo largo y ancho del planeta, son los pilares sobre los que se edifican todos los retos y desafíos que tendrá que superar la Humanidad, para no extinguirse como lo han hecho multitud de especies, y en todos ellos (guerras, hambrunas, enfermedades, gestión de recursos, políticas hídricas, contaminación, deforestación, etc...) el clima terrestre, sobre todo si la actividad humana lo modifica de forma temeraria, tendrá un papel determinante en el éxito o fracaso de nuestra propia supervivencia.

Además de la intervención humana en el cambio climático actual, el otro elemento completamente nuevo es el periodo de tiempo en el que se está produciendo dicho cambio. Nunca anteriormente, desde el origen de nuestro planeta, ningún cambio en el clima global se ha dado en tan pocos años. Este vertiginoso aumento de temperatura global, en términos de tiempo geológico, impide los ajustes adaptativos tanto en la fauna como en la flora, provocando extinciones de especies, migraciones y cambios de comportamiento animal y vegetal. Estos dos componentes del actual cambio climático, el papel del ser humano y la rapidez en el calentamiento global, hacen que no podamos evaluar comparativamente la situación presente con las ocurridas en tiempos pasados. Los efectos de nuestra alteración del medio ambiente conllevan un alto grado de incertidumbre en cuanto a su reversibilidad y sobre todo a lo catastrófico que puedan resultar para la especie humana y la vida en general sobre la Tierra.

El cambio climático actual está vinculado a un aumento de la temperatura media global que a menudo se conoce como calentamiento global. Si bien el término de calentamiento global considera el incremento de la temperatura y sus proyecciones a futuro, el concepto de cambio climático incluye al calentamiento global y sus efectos en las demás variables del clima.

Como se ha señalado, a diferencia de los cambios climáticos del pasado, el cambio climático actual tiene causas antropogénicas, es decir se está produciendo por las actividades humanas. A partir de la Revolución Industrial, el ser humano comenzó a explotar combustibles fósiles para sus actividades, lo cual devino en un aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera (Figura 38).



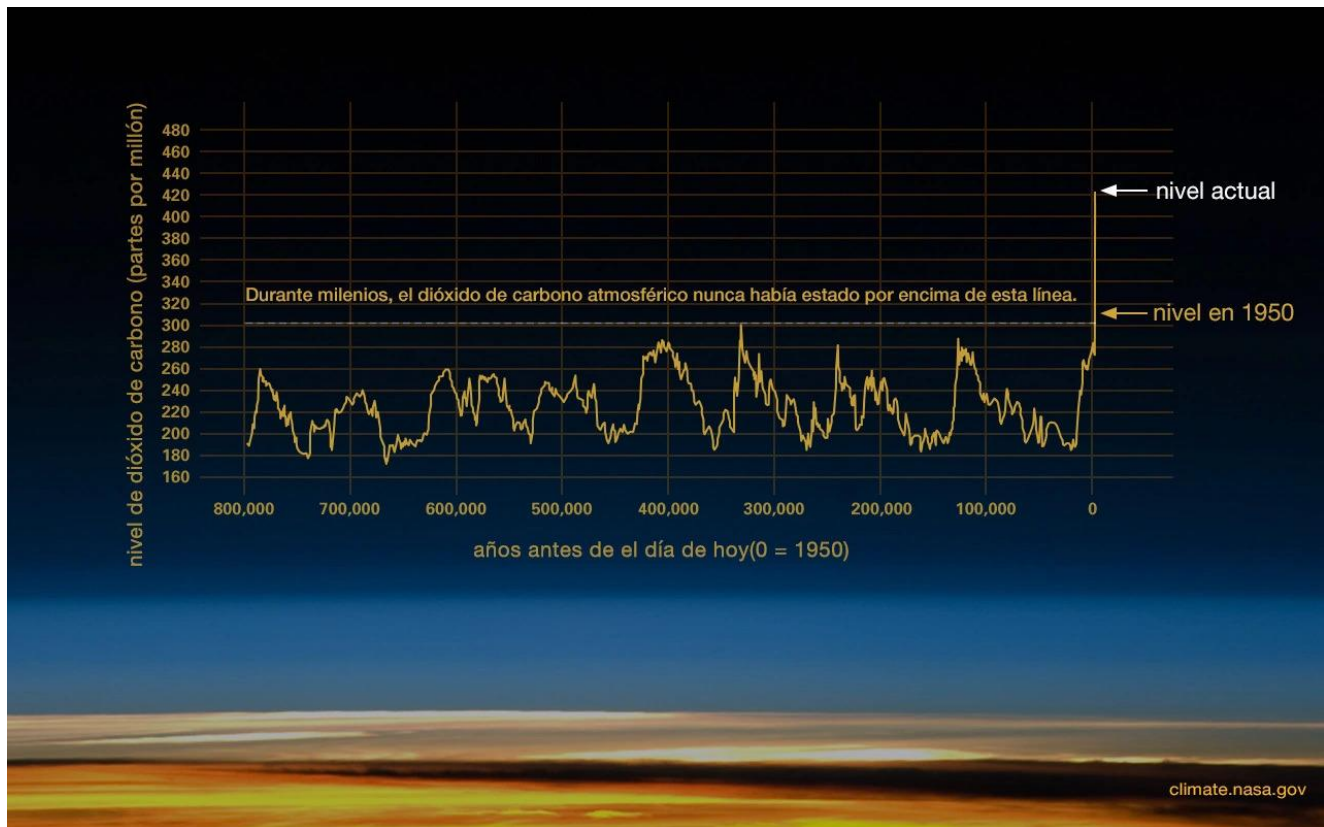


Figura 38: Gráfico que pone de manifiesto el aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico desde la Revolución Industrial, y su estabilidad durante los últimos 800 000 años, en los que se ven claramente los ocho periodos glacial-interglacial. La última glaciación hace unos 11 700 años marcó el comienzo de la era climática moderna y de la civilización humana. (Crédito: Luthi, D., et al. 2008; Ehteridge, DM, et al. 2010; datos de núcleos de hielo de Vostok/JR Petit et al.; registro de CO<sub>2</sub> de NOAA Mauna Loa)

Por dicho motivo, cuanto más se incremente la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, mayor será la temperatura en la Tierra, por ello hablamos del calentamiento global. Se estima que la temperatura media global ha aumentado 1,1 °C en comparación a la temperatura media global de la era preindustrial.

De momento, el suelo y el océano, que absorben y almacenan carbono, siguen aún reteniendo alrededor de la mitad de las emisiones de CO<sub>2</sub>, y son sumideros de carbono que todavía siguen incrementando su respuesta al CO<sub>2</sub> atmosférico, aunque el cambio climático ha reducido su ritmo de crecimiento de la absorción en torno a un 4 por ciento en el caso del océano y de un 17 por ciento en la tierra, durante el decenio de 2012 a 2021.

Los efectos del cambio climático no pueden afrontarse con criterios políticos-económicos, ni por países individuales, que suelen tener perspectivas cortoplacistas con el único fin de paliar la subida del nivel de los mares, salvar cosechas, o asegurar el consumo de agua potable para toda la población. Si prestáramos un poco de atención a las consecuencias de nuestro delirante comportamiento medioambiental, quizá podríamos superar esta importante prueba de supervivencia para nuestros hijos y nietos, y para el propio devenir de la Humanidad.

Nuestra adaptación al cambio climático será mejor o peor dependiendo de cómo se vayan resolviendo las guerras, el hambre, las desigualdades sociales y un largo etcétera de problemas que tenemos ahora mismo encima de la mesa. Este es el reto al que se enfrenta la humanidad en el presente siglo.

## REFERENCIAS Y CONSULTAS

- *Anuario del Real Observatorio Astronómico 2023 - Instituto Geográfico Nacional - 2023*
- *Los cielos de los planetas y satélites del Sistema Solar - Revista Digital ACTA nº 32*  
[https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/032001.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/032001.pdf)
- *Planetas extrasolares - Revista Digital ACTA nº 43*  
[https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/043001.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/043001.pdf)
- *Climatología del inframundo - Revista Digital de ACTA nº 42*  
[https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/042001.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/042001.pdf)
- *Climatología planetaria -Los otros climas del Sistema Solar- Antonio M. Moro Muñoz - RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U. - 2017*  
<https://www.acta.es/recursos/revista-digital-manuales-formativos/632-079>
- <https://climate.nasa.gov/en-espanol/datos/causas/>
- [https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/que-es-el-cambio-climatico-y-como-nos-afecta/doc\\_ncc\\_un\\_convencion.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/que-es-el-cambio-climatico-y-como-nos-afecta/doc_ncc_un_convencion.aspx)
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Clima\\_de\\_Marte](https://es.wikipedia.org/wiki/Clima_de_Marte)
- <http://cab.inta-csic.es/remes/es/atmosfera-de-marte/>
- <https://mars.nasa.gov/mer/gallery/press/spirit/20050420a.html>
- <https://solarsystem.nasa.gov/news/943/como-se-ven-los-amaneceres-y-los-atardeceres-en-marte/>
- <https://spaceplace.nasa.gov/mars-sojourner/sp/>
- <https://mars.nasa.gov/msl/spacecraft/rover/summary/>
- <https://climate.nasa.gov/en-espanol/datos/causas/>
- <https://www.divulgameteo.es/ampliab/7/222/Cambio-climatico-global-a-traves-del-tiempo-geologico.html>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Historia\\_de\\_la\\_ciencia\\_del\\_cambio\\_clim%C3%A1tico](https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_ciencia_del_cambio_clim%C3%A1tico)
- <https://www.ecologiaverde.com/cambios-climaticos-a-lo-largo-de-la-historia-3683.html>
- <https://www.bbc.com/mundo/noticias-50563893>
- <https://www.meteorologiaenred.com/cambio-climatico-venus.html>
- <https://www.eltiempo.com/vida/ciencia/lecciones-de-venus-a-la-tierra-sobre-cambio-climatico-66894>
- <http://planetario.unlp.edu.ar/divulgacion/el-colosal-cambio-climatico-de-marte-364>
- <https://solarsystem.nasa.gov/news/943/como-se-ven-los-amaneceres-y-los-atardeceres-en-marte/>
- <https://www.epdata.es/datos/cambio-climatico-datos-graficos/447>
- [https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/Climatico/informe\\_ipcc.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/mini-portales-tematicos/Climatico/informe_ipcc.aspx)
- [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/msl/images/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/images/index.html)
- [https://solarsystem.nasa.gov/planets/venus/galleries/?page=0&per\\_page=25&order=created\\_at+desc&search=&href\\_query\\_params=category%3Dplanets\\_venus&button\\_class=big\\_more\\_button&tags=venus&condition\\_1=1%3Ais\\_in\\_resource\\_list&category=51](https://solarsystem.nasa.gov/planets/venus/galleries/?page=0&per_page=25&order=created_at+desc&search=&href_query_params=category%3Dplanets_venus&button_class=big_more_button&tags=venus&condition_1=1%3Ais_in_resource_list&category=51)
- [https://www.ign.es/resources/acercaDe/libDigPub/CuestionesAstronomia\\_baja.pdf](https://www.ign.es/resources/acercaDe/libDigPub/CuestionesAstronomia_baja.pdf)
- <https://www.divulgameteo.es/fotos/lecturas/CC-Milankovitch.pdf>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Major\\_greenhouse\\_gas\\_trends.png](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Major_greenhouse_gas_trends.png)
- <https://www.eltiempo.es/noticias/el-ipcc-rotundo-hay-que-limitar-el-calentamiento-global-a-1-5-c>
- [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Spain/Todo\\_sobre\\_Mercurio](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Todo_sobre_Mercurio)

(Para comentarios y observaciones al autor: caronte@acta.es)