

MARTE

PASADO, PRESENTE Y FUTURO



THE **MARS** SOCIETY
ARGENTINA

MARTE

PASADO, PRESENTE Y **FUTURO**

Fundación Mendoza Crear

Marte : pasado, presente y futuro / compilación
de Gabriel Andrés Caballero. - 1a ed. - Ciudad
Autónoma de Buenos Aires : Grupo Abierto Libros,
2021.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: online

ISBN 978-987-47891-6-7

1. Planetas. 2. Tecnología Satelital. I. Caballero,
Gabriel Andrés, comp. II. Título.

CDD 523.43

© The Mars Society Argentina

© De esta edición Grupo Abierto Libros

**GRUPO ABIERTO**
L I B R O S

✉ libros@grupoabierto.com

 facebook.com/grupoabierto.libros

 [@grupoabierto.libros](https://www.instagram.com/grupoabierto.libros)

Diseño de tapa e interior: **Vanina Puente**

Queda prohibida su reproducción sin autorización del
editor.

Hecho el depósito que marca la ley 11.723

Hecho en Argentina

MARTE

PASADO, PRESENTE Y FUTURO

Este libro aborda el pasado, el presente y el futuro de la exploración de Marte. El dato sería referencial de no ser porque Marte se ha convertido en el máximo desafío exploratorio de nuestra generación. El planeta rojo está tan lejos de la Tierra y es tan difícil alcanzarlo con una misión tripulada, que la propia dificultad convierte el esfuerzo en una auténtica epopeya.

Y es precisamente esa epopeya tecnológica, cuyos episodios podemos seguir a diario en todos los medios de comunicación del mundo, lo que nos ha motivado a escribir este libro porque queremos ser parte, porque no nos basta con ser testigos atónitos, porque queremos ser protagonistas.

Nunca antes la exploración de Marte fue planteada con seriedad en la agenda cultural, científica o política de la Argentina. Nuestro propósito es romper esa cadena invisible y esa tara, interpelar a nuestra comunidad científica y también a nuestras autoridades para que Marte sea puesto en agenda, para que no pueda ser obviado ni ignorado.

Este propósito puede parecer ambicioso, pero cabe preguntarse qué hubiera sido de nuestro país, de nuestra sociedad y de nuestra cultura, si nuestros antepasados se hubieran conformado con la limitada comodidad de vivir en una colonia española.

¿Qué sería de nuestra actual aeronáutica sin aquellos adelantados que afirmaron la soberanía argentina en algo tan intangible como el espacio aéreo? ¿Qué hubiera sido de nuestra actualidad espacial sin aquellos idealistas que se propusieron extender las aspiraciones y sueños argentinos mucho más allá de la atmósfera?

La pulsión que nos llevó a la Patagonia y luego a la Antártida, la pulsión que nos llevó a extender los límites de nuestro mar territorial es la misma pulsión que hoy nos reclama plantear nuevos objetivos para el desarrollo tecnológico y para el crecimiento económico de nuestro país. Entre esos objetivos debe estar Marte, no solo porque es la aventura científica y tecnológica más ambiciosa y atrevida de nuestros tiempos, sino porque aquellos países que no se suban ahora al tren de la historia lo perderán para siempre.

En efecto, no todos los Estados que integran la Organización de Naciones Unidas tienen presencia espacial, solo la tienen aquellos que se animaron a lo desconocido, como lo hizo la Argentina al crear la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales en 1960, en los albores de la Carrera Espacial entre los Estados Unidos y la Unión Soviética, las dos superpotencias por entonces dominantes. Hoy el tablero geopolítico mundial es diferente, pero una nueva Carrera Espacial se está corriendo y tiene a Marte como meta. Nuestro país debe reclamar un lugar, aunque sea pequeño.

La prueba de que podemos aspirar a Marte la constituye este libro. Decidimos escribirlo de manera colectiva, desde un país perdido en el extremo austral del mundo, en plena crisis económica y atravesando todas las limitaciones generadas por la pandemia del Coronavirus. Es decir, planteamos algo casi imposible en el peor contexto y en el peor momento de la historia contemporánea. Sin embargo, y como el lector ya se habrá dado cuenta, este libro es hoy una realidad, lo que confirma que lo imposible se logra con la decisión de comenzar. Seguramente, la participación de la Argentina en la exploración de Marte se logrará con esa misma decisión.

La mitad de los autores de este libro son profesionales de incuestionable trayectoria en temáticas espaciales. La otra mitad son estudiantes y aficionados que acceden por primera vez a este tipo de experiencias. Sin embargo, al recorrer las páginas de esta obra el lector no logrará distinguir entre unos y otros pues todos dieron lo mejor de sí. En el proceso, los expertos encendieron la llama de una antorcha que los más jóvenes deberán entregar en el futuro a los nuevos protagonistas.

El resultado de este trabajo colectivo es una obra compacta, enciclopédica, que aborda la realidad marciana desde todos sus planos y perspectivas. Ningún autor individual, por encumbrado que sea, podría haber logrado lo que todos construyeron en conjunto y quizá esa sea la primera enseñanza que deja este libro, no solo como producto bibliográfico sino como ejemplo práctico de cómo llegar a Marte. O nuestra especie llega colaborando, trabajando en equipo, o no llegará nunca.

Escribimos este libro como adhesión al XI Congreso Argentino de Tecnología Espacial de abril de 2021 gracias al esfuerzo conjunto de la Asociación Argentina de Tecnología Espacial (AATE), el Consejo Profesional de Ingeniería Aeronáutica y Espacial (CPIAyE), la Universidad de Mendoza (UM) y The Mars Society Argentina–Fundación Mendoza Crear (TMSA). No es un dato menor que las entidades nombradas se hayan mantenido unidas para llevar adelante este evento en plena crisis, ni tampoco es menor que la comunidad espacial argentina se haya mantenido unida para respaldarlas. Lo uno y lo otro son síntomas de entusiasmo y de optimismo, es el estado de ánimo que nos llevó a colocar satélites argentinos en el espacio, el mismo con el que nuestra especie llegó a la Luna antes de 1970 y el que nos hará llegar a Marte antes de 2050.

Por supuesto, no somos ingenuos. Es muy probable que ninguno de los autores de este libro pisemos Marte jamás. Sin embargo, eso no importa. Las grandes obras de las naciones son transgeneracionales y, por eso mismo, siempre trascienden a los precursores. Nuestro objetivo se resume en dar el primer paso, motivar a que nuestro país se comprometa en participar en el desafío marciano y servir de inspiración para que futuras generaciones de argentinos puedan alcanzar el planeta rojo.

Durante la elaboración de este libro dos autores sufrieron la pérdida de sus padres, pese a lo cual siguieron adelante con sus respectivos capítulos. Por ello, deseamos dedicar esta obra a la memoria de Miguel Antonio Marón, fallecido el 18 de enero de 2020, y a la memoria de Ana Hernández, fallecida el 25 de noviembre de 2020.

Los autores:

Ciudad Autónoma de Buenos Aires

Coronel Rosales, La Plata, Mar del Plata, San Justo, Quilmes, Ituzaingó y Villa Luzuriaga (Provincia de Buenos Aires)

Alta Gracia, Córdoba Capital y La Falda (Provincia de Córdoba)

Ciudad de Corrientes (Provincia de Corrientes)

Guaymallén, Godoy Cruz y Luján de Cuyo (Provincia de Mendoza)

General Fernández Oro, Bariloche y General Roca (Provincia de Río Negro)

Ciudad de San Juan, Rawson y Rivadavia (Provincia de San Juan)

Ciudad de Rosario y Ciudad de Santa Fe (Provincia de Santa Fe)

Ciudad de Salta, La Caldera (Provincia de Salta)

Río Gallegos (Provincia de Santa Cruz)

Abril de 2021

Astrofísica de Marte

Florencia Nadine Rizzo¹

“Nos encontramos a unos 200 millones de kilómetros de distancia, y aun así tengo una certeza sobre vos. Estás ahí, del otro lado de estas líneas, investigando mi historia: pasado, presente y futuro.

Y yo aquí, bajo la mirada curiosa de ustedes, humanos, asiduamente ruborizado.”

LIFTOFF

Esta es una invitación para que nos sumerjamos en la perfección del Universo. El itinerario requiere imaginar cronológicamente las etapas evolutivas del planeta Marte. La física será guía a lo largo de este recorrido a través de una descripción fascinante de la naturaleza cósmica que nos rodea. Bienvenidos a este viaje por el tiempo. Nuestra primera estación es el origen del Sistema Solar.

Metamorfosis

Todo comenzó en una nebulosa solar, hace 4.5 billones de años². Existe una vasta cantidad de ellas en las galaxias, con diferentes formas y tamaños. Son nubes interestelares compuestas por polvo y gas, que se caracterizan por constituir zonas extensas, frías y densas. Mayormente contienen hidrógeno y helio, los dos átomos más simples y abundantes del Universo, más una pequeña cantidad de hielo y granos de polvo de elementos pesados recubiertos por hielo³. En la Figura 1 se muestra una zona de formación estelar, donde se hallan estas bellas regiones creadoras de estrellas y mundos.

El proceso de formación se inició cuando nuestra nube progenitora sufrió una perturbación ocasionada por un evento externo. Posiblemente se encontró con una onda de choque producida en la explosión de una estrella cercana, interactuó con nubes moleculares galácticas o atravesó una onda espiral de densidad⁴. Independientemente del fenómeno ocurrido, su consecuencia fue el origen del Sistema Solar.



Figura 1

Imagen de los Pilares de la Creación, pertenecientes a la Nebulosa del Águila. Fue tomada por el telescopio espacial Hubble y publicada en el año 2015. Se pueden apreciar tres torres compuestas por polvo y gas que dan lugar al nacimiento de estrellas. (NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA))

Se infiere que la nebulosa en el inicio giraba en sentido antihorario, a partir del movimiento traslacional y rotacional que hoy observamos de la mayoría de los planetas y lunas -visto desde arriba del plano de la eclíptica, que es aquel en el que la Tierra orbita al Sol⁵. Esto es para destacar pues, como al principio tenía ese giro, cuando fue perturbada colapsó gravitatoriamente y formó un objeto central rodeado por un disco de polvo y gas en su región ecuatorial⁶. Ese proceso físico surgió cuando la presión interna de la nube no logró contrarrestar la

¹ 25 años, estudiante de la Licenciatura en Astronomía en la Universidad Nacional de La Plata

² Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 28.

³ Comins Neil F. y Kaufmann Willian J., Discovering the universe, Editorial W. H. Freeman and Company, Estados Unidos, 2014; página 135.

⁴ Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 28.

⁵ Comins Neil F. y Kaufmann Willian J., Discovering the universe, Editorial W. H. Freeman and Company, Estados Unidos, 2014; página 14.

⁶ Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 28.

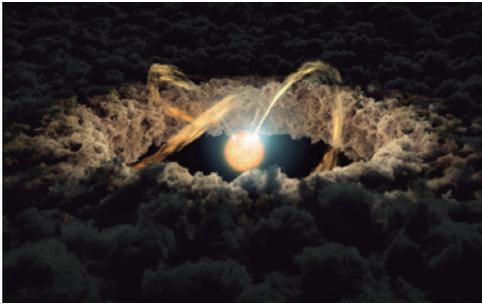


Figura 1.2

Ilustración de una estrella rodeada por un disco protoplanetario. Las curvas envolventes y brillantes que se observan alrededor del objeto central representan las líneas de su campo magnético, a través de las cuales el material del disco fluye hacia la superficie de la estrella. (NASA/JPL-Caltech)



Figura 1.3

Ilustración de un protoplaneta que se encuentra acreta objetos rocosos. Mediante este proceso se entiende que estos cuerpos crecen hasta convertirse finalmente en planetas. (Alan Brandon)

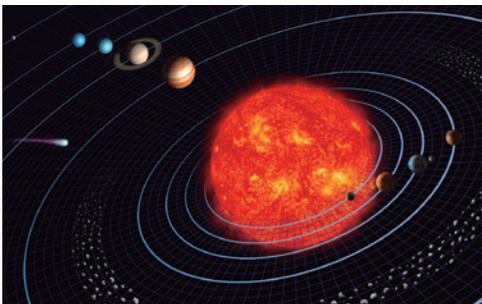


Figura 1.4

Esquema del Sistema Solar. En el centro se encuentra representado el Sol, con color anaranjado y su majestuoso tamaño. A su derecha se pueden observar los cuatro planetas terrestres (Mercurio, Venus, la Tierra con su luna y Marte) y, a su izquierda, los cuatro gigantes gaseosos (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) más el planeta enano Plutón. Delimitando las dos clasificaciones, se puede apreciar el cinturón de asteroides. La región transneptuniana contiene una vasta cantidad de objetos que no se hallan ilustrados y se encuentran en la misma zona en la que está Plutón. (NASA/JPL)

fuerza gravitatoria presente sobre la materia⁷. La situación es similar a la del juego de la soga-cinchada: las dos fuerzas tironean en sentidos contrarios. La presión tiende a hacer que la nube se expanda y la gravedad, a que se contraiga. Como consecuencia, esta última tomó el mando de la dinámica de manera que el polvo y el gas tendieron a caer sobre un mismo centro de gravedad, el abultamiento central.

Por si acaso repasemos qué es la interacción gravitatoria, dado que es fundamental entenderla para analizar la mecánica planetaria. En 1666, Issac Newton procuró ceñirla a la Ley de Gravitación Universal, en la que explicó que dos partículas se atraen entre sí con una fuerza que es proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas⁸. Esto implica que la fuerza gravitatoria depende de las dos masas que interactúan y se infiere que será mayor cuanto más cerca se encuentren y menor cuanto más alejadas estén.

Por ejemplo, si soltamos una pelota desde el balcón de un octavo piso caerá de inmediato hacia la superficie de la Tierra. Esto ocurre porque la masa del planeta es mucho mayor que la de la pelota -por lo tanto, se siente atraída-, y porque la distancia entre ambas es pequeña. Otra interacción gravitatoria que nos resulta familiar y podemos ver a diario es la que ocurre entre la Luna y nuestro planeta. Como consecuencia de la fuerza gravitatoria, la Luna da vueltas (órbita) a nuestro alrededor.

Retomemos la descripción del proceso de formación del Sistema Solar. Con el paso del tiempo la dinámica se volvió cada vez más bonita e impetuosa y dio lugar al colapso gravitatorio del objeto central⁹. Fue entonces cuando el material circundante -polvo y gas- fue atraído hacia la región central y aumentó la densidad, presión y temperatura de la zona. Como consecuencia, la situación se tornó radiante: se produjo una concentración de material denominada protoestrella, caracterizada por la emisión de luz a partir del gran aumento en la temperatura provocada por las colisiones en el gas¹⁰. Cuando su presión y temperatura central fueron suficientes para activar la fusión nuclear, se convirtió finalmente en nuestra estrella: el Sol¹¹. A partir de ese momento comenzó a transformar hidrógeno en helio, al tiempo que libera enormes cantidades de energía¹².

Es interesante la razón por la cual se entiende que se forma un disco protoplanetario junto con el objeto central, en vez de crearse solamente una estrella -o más- sin ese material a su alrededor. Este disco mencionado se define como aquel que está conformado por polvo y gas y rodea a una estrella joven¹³, como el que se muestra en la Figura 2. Mediante observaciones se puede medir una magnitud asociada a las rotaciones de las nubes que dan origen al proceso descrito: el momento angular. Por argumentos físicos que exceden el alcance de esta lectura, esa cantidad se tiene que conservar. Por ende, el sistema resultante, luego de que

⁷ Comins Neil F. y Kaufmann Willian J., *Discovering the universe*, Editorial W. H. Freeman and Company, Estados Unidos, 2014; página 134.

⁸ Kleppner Daniel y Kolenkow Robert, *An introduction to mechanics*, Editorial Cambridge University Press, Reino Unido, 2014; página 83.

⁹ Barlow Nadine, *Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere*. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 28.

¹⁰ Comins Neil F. y Kaufmann Willian J., *Discovering the universe*, Editorial W. H. Freeman and Company, Estados Unidos, 2014; página 135

¹¹ Weissman Paul R., *Encyclopedia of the Solar System*. Editorial Elsevier Academic Press, 2007; página 22.

¹² Comins Neil F. y Kaufmann Willian J., *Discovering the universe*, Editorial W. H. Freeman and Company, Estados Unidos, 2014; página 327.

¹³ Comins Neil F. y Kaufmann Willian J., *Discovering the universe*, Editorial W. H. Freeman and Company, Estados Unidos, 2014; página 135.

ocurre el colapso, debe mantener el movimiento rotacional que tenía inicialmente la nube. En el supuesto caso de que colapse para formar una estrella sin un disco protoplanetario, debería girar a velocidades tan altas que provocaría su disgregación. Por lo tanto, se concluye que el colapso gravitacional deriva en la creación de una o más estrellas, junto con un disco alrededor que obtiene la mayor parte del momento angular de la nube.

Durante el proceso de desarrollo del Sol, el movimiento rotacional del disco protoplanetario provocó que los pequeños granos microscópicos de polvo -del orden de 1 a 30 micrómetros de diámetro- colisionen y se junten, y creen objetos macroscópicos cada vez más grandes¹⁴.

En simultáneo, la dinámica cinética y gravitatoria del sistema dispuso los granos en el entorno del centro del disco, sitio en el cual el Sol estaba en formación. El acercamiento de estas partículas a zonas más densas produjo que sus tasas de crecimiento aumentarían¹⁵. Esto permite explicar por qué las órbitas planetarias que se observan en la actualidad son casi planas y coinciden aproximadamente con el plano de la eclíptica¹⁶ que está inclinada unos 7.2° respecto del ecuador del Sol¹⁷. Por ejemplo, el plano que contiene la órbita de Marte forma un ángulo pequeño de 1.85° con el de la eclíptica¹⁸.

Los objetos incrementaron sus tamaños hasta que algunos obtuvieron dimensiones de aproximadamente 1 km, llamados planetesimales. Sus masas fueron suficientes como para atraerse entre sí, lo que dio lugar a colisiones, rupturas, polvo y también cientos de objetos aún más grandes, como del tamaño y masa de la Luna. Y aquí estamos en vísperas del nudo de nuestra explicación: cómo se formó Marte. Los planetesimales de tal tamaño fueron capaces de aspirar los escombros que los rodeaban, o bien arrojarlos hacia zonas lejanas a ellos. De esta manera crecieron, despejaron su alrededor y encabezaron la formación de los planetas terrestres: Mercurio, Venus, Tierra y Marte¹⁹ -los cuatro pertenecen a esa categoría porque tienen densidades similares a la de la Tierra, por lo que se concluye que están compuestos por químicos similares²⁰-. La colisión de cientos de estos objetos del tamaño aproximado de la Luna -y aún más grandes-

fue el proceso final que se cree que los formó. La Figura 3 contiene una ilustración de la situación mencionada.

El tiempo estimado para la culminación de la formación de Marte es entre 5 y 10 millones de años²¹. Resulta poco comparado con lo que se cree que le tomó a la Tierra, que son entre 50 y 150 millones de años²².

Los otros cuatro planetas, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, son parte de la categoría planetas gigantes debido a sus tamaños y composición. Los primeros dos son llamados gigantes gaseosos y los otros, gigantes de hielo²³.

El hecho de que los planetas del Sistema Solar se hayan formado por muchos escombros en movimiento es la razón por la cual rotan²⁴. Imaginemos un núcleo rodeado de material que gira a su alrededor. Al tener mayor masa que los objetos circundantes a pequeñas distancias, los atrae y compone dentro de sí. Esto provoca que les impriman parte de su movimiento inicial al adherirse.

Para terminar de esquematizar el Sistema Solar, que se puede visualizar a grandes rasgos en la Figura 4, faltan describir dos zonas tan encantadoras como pobladas: el cinturón de asteroides y la región transneptuniana. La primera está delimitada entre las órbitas del planeta rojo y Júpiter, y representa una buena referencia para distinguir los dos tipos de planetas. Del lado más cercano al Sol están los terrestres y del lado más lejano los gigantes. Como su nombre lo indica, la componen asteroides: cuerpos menores cuyos radios no superan los 500 km²⁵ (a modo de comparación podemos pensar que la Luna tiene aproximadamente 1737.5 km²⁶). El más grande -y probablemente el más mediático- es Ceres, que fue descubierto en 1801 y fue considerado entonces como un planeta, aunque poco tiempo después se clasificó como asteroide y en la actualidad como un planeta enano. Como dato de color, al menos un asteroide tiene el nombre del gato de un astrónomo. Hay tantos de ellos que no alcanzaron los dioses de la mitología para nombrarlos, por lo que sus descubridores debieron buscar otras alternativas²⁷.

¹⁴ Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 28.

¹⁵ Weissman Paul R., Encyclopedia of the Solar System. Editorial Elsevier Academic Press, 2007; página 22.

¹⁶ Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 28.

¹⁷ Beck J. G. y Giles P. 2005 ApJL 621 L153

¹⁸ Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 20.

¹⁹ Comins Neil F. y Kaufmann Willian J., Discovering the universe, Editorial W. H. Freeman and Company, Estados Unidos, 2014; página 137.

²⁰ Comins Neil F. y Kaufmann Willian J., Discovering the universe, Editorial W. H. Freeman and Company, Estados Unidos, 2014; página 139.

²¹ Dauphas & Pourmand (2011), Nature, 473.

²² Touboul et al. (2007), Nature, 450, y Jacobson et al. (2014), Nature, 508.

²³ Comins Neil F. y Kaufmann Willian J., Discovering the universe, Editorial W. H. Freeman and Company, Estados Unidos, 2014; página 138.

²⁴ Comins Neil F. y Kaufmann Willian J., Discovering the universe, Editorial W. H. Freeman and Company, Estados Unidos, 2014; página 138.

²⁵ Lissauer Jack J. y De Pater Imke, Fundamental Planetary Science. Editorial Cambridge University Press, New York, USA, 2013; página 7.

²⁶ Lissauer Jack J. y De Pater Imke, Fundamental Planetary Science. Editorial Cambridge University Press, New York, USA, 2013; página 519.

²⁷ Weissman Paul R., Encyclopedia of the Solar System. Editorial Elsevier Academic Press, 2007; página 2.

La región transneptuniana es análoga a la de asteroides, pero bastante más grande -su masa total es aproximadamente dos órdenes de magnitud mayor-, con otra ubicación y objetos diferentes. Se encuentra más allá de la órbita de Neptuno, el planeta más alejado del Sol, y la componen cuerpos helados²⁸. Plutón, otro objeto de la fardanda astronómica, se consideró por varios años como el noveno planeta del Sistema Solar, aunque esto siempre generó controversia entre los astrónomos y derivó en la necesidad de crear la definición formal de un planeta.

En el año 2006 la Unión Astronómica Internacional estableció tres características que debe cumplir un objeto celeste del Sistema Solar para ser considerado como un planeta: su forma debe ser esférica, lo que indica que su interior se encuentra en equilibrio hidrostático, debe orbitar al Sol y debe ser lo suficientemente masivo como para que su gravedad haya limpiado los escombros de su alrededor²⁹.

Como Plutón no cumple la tercera propiedad, fue categorizado como un planeta enano. Además, se pudo determinar que se encuentra en la región transneptuniana.

Planetas gigantes, arquitectos de los planetas terrestres

Hasta aquí, hemos visto el proceso físico a través del cual se entiende cómo se formó el Sistema Solar y, en particular, cómo se construyeron los planetas terrestres como Marte. Indaguemos ahora cómo fue el escenario dinámico de los planetas en ese tiempo, cuando todavía estaban sumergidos en el disco protoplanetario.

Durante 20 años se ha intentado reproducir, sin completo éxito, la formación planetaria del Sistema Solar. Las simulaciones no lograban representar la pequeña masa que tiene Marte³⁰, en su lugar se obtenía un planeta similar pero mucho más grande³¹ que se alejaba de manera considerable de satisfacer las condiciones físicas observadas de nuestro vecino rojizo. En esos cálculos se utilizaron modelos clásicos, que suponen que las órbitas de los planetas gigantes en la época de formación de los terrestres fueron las mismas o cercanas a las que tienen en la actualidad³².

En el año 2014 se propuso un modelo que plantea una posible solución al problema relacionado con la masa de Marte y, además, ofrece resultados coherentes con los estimados para otros puntos importantes que se detallarán en breve. Se basa en que las órbitas de Júpiter y Saturno han cambiado de manera significativa con el tiempo de manera que ambos ingresaron a la región interior del Sistema Solar. La presencia de los gigantes en esa zona pudo haber determinado el ámbito de formación de los planetas terrestres, ya sea respecto de las cantidades de escombros que tuvieron disponibles para alimentarse, como también de su composición química.

En este escenario, Marte surge de un embrión que quedó dispuesto en una región escasamente poblada para su desarrollo, de modo que tuvo pocos sólidos disponibles para acretar -incorporar- y crecer³³.

Este modelo se llama “Gran Viraje” -Grand Tack en inglés-³⁴, nombre con tintes náuticos que se va a comprender mejor a continuación. Imaginemos por un momento que el disco protoplanetario es el mar. Júpiter, almirante cósmico, empieza a acretar gas y por efectos hidrodinámicos adquiere un movimiento que lo hace navegar hacia el interior del Sistema Solar y atravesar el cinturón de asteroides. Saturno, comodoro de marina, emprende su viaje detrás de su superior. En esta etapa Júpiter atrajo hacia sí mismo los planetesimales cercanos contenidos en el disco y los aspiró. En simultáneo, también dispersó algunos de ellos hacia órbitas más excéntricas, es decir, con formas menos circulares. Esto continuó hasta que otro efecto hidrodinámico se hizo presente: los dos planetas gaseosos viraron y emprendieron la vuelta hacia la región en la que se encuentran en la actualidad³⁵.

Al regreso, ambos dispersaron los planetesimales que se les cruzaban en sus caminos. Algunos eran primitivos de la región y otros, aquellos que habían sido dispersados antes durante su migración hacia el interior. En esta etapa una fracción de esos objetos adquirió órbitas interiores a Júpiter, aunque la mayoría fue eyectada fuera del Sistema Solar. Como estos planetas gaseosos estaban alejándose hacia la zona exterior, la atracción gravitatoria que ejercían sobre los plane-

²⁸ Lissauer Jack J. y De Pater Imke, *Fundamental Planetary Science*. Editorial Cambridge University Press, New York, USA, 2013; página 310.

²⁹ Weissman Paul R., *Encyclopedia of the Solar System*. Editorial Elsevier Academic Press, 2007; página 3.

³⁰ Raymond Sean, *Formation of telluric planets and the origin of terrestrial water*. Editorial EDP Sciences, https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2014/01/bioconf_epov2012_01003/bioconf_epov2012_01003.html, 2014; página 1.

³¹ Raymond Sean, *Formation of telluric planets and the origin of terrestrial water*. Editorial EDP Sciences, https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2014/01/bioconf_epov2012_01003/bioconf_epov2012_01003.html, 2014; página 2.

³² Raymond Sean, *Formation of telluric planets and the origin of terrestrial water*. Editorial EDP Sciences, https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2014/01/bioconf_epov2012_01003/bioconf_epov2012_01003.html, 2014; página 2.

³³ Sean Raymond, *Formation of telluric planets and the origin of terrestrial water*. Editorial EDP Sciences, https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2014/01/bioconf_epov2012_01003/bioconf_epov2012_01003.html, 2014; página 4.

³⁴ Walsh et al. (2011), *Nature*, 475, 206.

³⁵ Raymond Sean, *Formation of telluric planets and the origin of terrestrial water*. Editorial EDP Sciences, https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2014/01/bioconf_epov2012_01003/bioconf_epov2012_01003.html, 2014; página 5.

simales que se encontraban bajo su influencia se fue debilitando. Por eso, algunos lograron sobrevivir con órbitas interiores a ellos³⁶.

Como consecuencia, el modelo plantea que los dos gigantes pudieron haber removido una gran cantidad de escombros y dejado disponible una escasa cantidad de ellos para la formación de los planetas terrestres. A su vez, aportaron objetos con diversas composiciones, ya que acercaron sólidos construidos en condiciones diferentes de las existentes en la parte interior del Sistema Solar.

El Gran Viraje reproduce masas, órbitas y tiempos de formación similares a las esperadas para los planetas terrestres³⁷. Además, también explica la estructura del cinturón de asteroides que se observa en la actualidad, ya que Júpiter y Saturno atravesaron dos veces la región y provocaron modificaciones³⁸.

Existe otra arista que se debe tener en cuenta a la hora de intentar reproducir la formación de los planetas terrestres: el agua. El modelo propone una explicación para el origen de esta sustancia en la Tierra. Mercurio, Venus, nuestro planeta y Marte deberían ser secos³⁹, porque la región interna del Sistema Solar donde se formaron era muy caliente como para permitir que el agua se condensara. Eso implica que los escombros primitivos de esa zona no hayan podido contener la sustancia⁴⁰. Sin embargo, la composición del disco protoplanetario en la región de formación de los terrestres fue modificada por los gigantes gaseosos, quienes, con su influencia, entregaron objetos ricos en agua que habían sido formados antes en una zona más fría del Sistema Solar⁴¹.

En el año 2018 se propuso otro modelo para intentar explicar la baja masa de Marte: la Inestabilidad Temprana⁴². Consiste en una inestabilidad gravitacional ocurrida en la región exterior del Sistema Solar compuesta, en ese momento, por cinco planetas. La perturbación ocurrida entre los gigantes pudo haber logrado eyectar el quinto adicional e influenciar la formación de los planetas terrestres. Durante ese proceso se habrían removido grandes embriones de la vecindad de Marte, de manera que pudieron haber sido depositados en la cercanía de la Tierra y Venus, o bien eyectados.

A través de una amplia cantidad de simulaciones, los autores mostraron que, si el evento de inestabilidad ocurrió en etapas tempranas de la formación del Sistema Solar, entre 1 y 10 millones de años luego de la disipación del gas en el disco, es posible obtener masas para



Figura 1.5

Representación de la posible colisión entre Marte y un protoplaneta. Tal impacto pudo haber dado origen a las dos lunas que orbitan actualmente el planeta. (Université Paris Diderot / Labex UnivEarthS)



Figura 1.6

Imagen de Fobos, la luna más grande y cercana de Marte. Fue tomada por el orbitador Mars Reconnaissance en el año 2008, cuando se encontraba a una distancia de aproximadamente 6800 kilómetros. La publicación tuvo lugar en enero del 2013. (NASA/JPL-Caltech/University of Arizona)

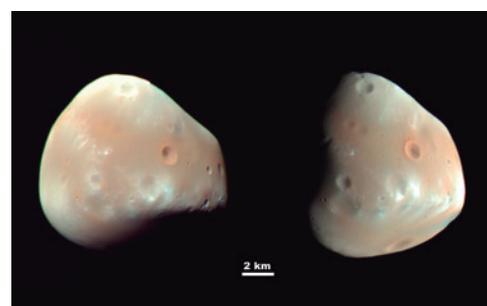


Figura 1.7

Imágenes de Deimos, la luna más pequeña y lejana de Marte. En la parte inferior central se puede observar un parámetro de distancia, de manera que la longitud indicada corresponde a dos kilómetros. Fueron capturadas en el 2009 por el orbitador Mars Reconnaissance y se publicaron en el mismo año. (NASA/JPL/University of Arizona)

³⁶ Raymond Sean, Formation of telluric planets and the origin of terrestrial water. Editorial EDP Sciences, https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2014/01/bioconf_epov2012_01003/bioconf_epov2012_01003.html, 2014; página 5.

³⁷ Raymond Sean, Formation of telluric planets and the origin of terrestrial water. Editorial EDP Sciences, https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2014/01/bioconf_epov2012_01003/bioconf_epov2012_01003.html, 2014; página 4.

³⁸ Raymond Sean, Formation of telluric planets and the origin of terrestrial water. Editorial EDP Sciences, https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2014/01/bioconf_epov2012_01003/bioconf_epov2012_01003.html, 2014; página 1.

³⁹ Raymond, Sean Formation of telluric planets and the origin of terrestrial water. Editorial EDP Sciences, https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2014/01/bioconf_epov2012_01003/bioconf_epov2012_01003.html, 2014; página 5.

⁴⁰ Raymond Sean, Formation of telluric planets and the origin of terrestrial water. Editorial EDP Sciences, https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2014/01/bioconf_epov2012_01003/bioconf_epov2012_01003.html, 2014; página 1.

⁴¹ Raymond Sean, Formation of telluric planets and the origin of terrestrial water. Editorial EDP Sciences, https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2014/01/bioconf_epov2012_01003/bioconf_epov2012_01003.html, 2014; página 6.

⁴² Clement et al. (2018), *Icarus*, 311, 340.

los planetas consistentes con los datos que se tienen de ellos en la actualidad.

Es importante remarcar que los científicos se encuentran en una continua búsqueda de modelos superadores. No cuentan con la capacidad de viajar en el tiempo para observar qué ha pasado, sin embargo pueden utilizar métodos científicos para intentar comprender la naturaleza y su historia⁴³.

Lunas: Fobos y Deimos

La historia del planeta rojo continúa y, probablemente, las colisiones violentas también. Otra de sus características controversiales son sus lunas: Deimos y Fobos. Por mucho tiempo se creyó que estos dos satélites naturales fueron asteroides que pasaron por la cercanía del planeta y, por interacción gravitatoria, fueron capturados. Tienen formas irregulares y pequeñas, propias de este tipo de cuerpos celestes. Además, comparten propiedades físicas similares con los asteroides de tipo-D, entre ellas baja densidad, reflectancia roja y bajo albedo⁴⁴. Este último representa la fracción de luz que les llega a los objetos y es dispersada por sus superficies, de forma tal que regresa directamente hacia el espacio. Los que no dispersan luz tienen el albedo más bajo, que es igual a 0. Por otro lado, los que dispersan toda la luz que los golpea tienen albedo igual a 1⁴⁵.

Sin embargo, durante los años 70 y 80 se realizaron estudios dinámicos que demostraron que sus órbitas actuales casi circulares, con sentido antihorario y ecuatoriales -dispuestas en el plano de su ecuador-, son muy poco probables en un escenario de captura⁴⁶. Para una situación como esta, se esperaría que sean más excéntricas y que estén en planos inclinados respecto del ecuador.

Dos estudios independientes entre sí proponen un mismo escenario posible que pudo haber dado origen a las lunas de Marte. Se trata de una gran colisión entre el planeta rojo y un protoplaneta de un tercio de su tamaño durante la última etapa de su desarrollo, entre 100 y 800 millones de años después del comienzo de la formación planetaria. Bajo esas consideraciones, se obtienen resultados consistentes con la composición, densidad y las órbitas observadas de los dos satélites. En la Figura 5 se muestra una representación artística del encuentro.

El impacto caótico produjo escombros situados en un disco alrededor de Marte compuesto por dos regiones: una interna, densa y

con materia en fusión; y otra externa, delgada y con gas. En la región interna, se habría formado una luna de dimensión 1000 veces más grande que Fobos -como hemos visto, la masa es un parámetro fundamental para las interacciones gravitacionales, junto con la distancia-. Como esta luna era tan masiva, habría interactuado con la región externa del disco y formado otros satélites pequeños y distantes en esa zona más alejada de Marte. Finalmente quedaron acompañando el planeta unas 10 lunas pequeñas, más la enorme.

Con el pasar del tiempo, pocos millones de años, el disco se disipó y Marte atrajo la mayoría de ellas hacia sí mismo, incluida la más masiva. Las únicas que sobrevivieron fueron las dos más distantes: Fobos y Deimos.

Respecto de la composición de los satélites naturales, una de las investigaciones indica que coincide con la de la materia primordial que formó Marte. En paralelo, sobre la base de estudios estadísticos, que consideran la composición diversa que posee el cinturón de asteroides, descartan la posibilidad de que hayan sido capturados.

También, se observa que las lunas tienen baja densidad. De hecho, allí radica el problema de otro posible origen discutido que postula que se formaron junto con Marte, en el mismo momento. Esto explica por qué tienen la misma composición, pero no su baja densidad. En el marco de la gran colisión, los dos estudios coinciden en que los satélites estuvieron compuestos desde el principio por granos muy finos, por lo que no pudieron haberse formado en la zona interior del disco, con magma, sino que solo pudieron haberlo hecho en la zona exterior. Esta podría ser la razón de su alta porosidad interna que resulta en la baja densidad.

En los próximos años se llevarán a cabo misiones espaciales que permitirán estudiar en detalle la composición de las lunas. Por ejemplo, la agencia espacial japonesa planea lanzar la misión Martian Moons Exploration -se describe en profundidad en el capítulo 28-, que intentará traer a la Tierra muestras de la superficie de Fobos⁴⁷.

“Nadie se baña dos veces en el mismo río”, frase por demás certera atribuida a Heráclito de Éfeso. El río fluye, transforma. No se mantiene igual en el tiempo, al igual que la naturaleza en sí misma. Estamos inmersos en cambios constantes y Marte no es la excepción: veamos qué se cree que pasará con Fobos, su luna más grande y cercana que se puede observar en la Figura 6. En un día marciano -es decir, en el tiempo que le toma al planeta completar un giro sobre su eje de rota-

⁴³ Clement et al. Mars' growth stunted by an early giant planet instability. Editorial Elsevier, http://www.planetary.brown.edu/pdfs/clement_etal_icarus_2018.pdf, 2018, página 1.

⁴⁴ T. Ronnet et al 2016 ApJ 828 109, Reconciling the orbital and physical properties of the martian moons. Editorial The American Astronomical Society, 2016; página 1.

⁴⁵ Comins Neil F. y Kaufmann William J., Discovering the universe, Editorial W. H. Freeman and Company, Estados Unidos, 2014; página 146.

⁴⁶ T. Ronnet et al 2016 ApJ 828 109, Reconciling the orbital and physical properties of the martian moons. Editorial The American Astronomical Society, 2016; página 1.

⁴⁷ A giant impact: solving the mystery of how Mars' moons formed. Editorial CNRS News, Paris, https://www.cnrs.fr/sites/default/files/press_info/2018-08/pr_phobos_deimos_web.pdf, 2016.

ción- realiza aproximadamente tres órbitas a su alrededor. Un espectáculo visual para quienes lo podrán observar desde el terreno rojizo en un futuro no muy lejano. Sin embargo, se estima que dentro de 50 millones de años ocurrirá un gran cambio: Fobos colisionará con su planeta o bien se fragmentará y formará un anillo a su alrededor. Este final podría ser consecuencia de la pérdida de energía que sufre su órbita debida a la interacción que tiene con Marte que le provoca un movimiento con forma de espiral hacia el planeta⁴⁸, sutil y casi imperceptible en un período de tiempo corto.

Deimos, por otro lado, es el satélite natural marciano más pequeño y distante. Al igual que Fobos, y al contrario que nuestra Luna, es muy oscuro. Su órbita es asazmente circular y le permite completar una vuelta alrededor de Marte cada 1.26 días terrestres. En la Figura 7 se puede apreciar una imagen suya⁴⁹.

Agua

Se han propuesto dos mecanismos diferentes que podrían haber incorporado agua al planeta rojo. Uno de ellos está relacionado con su etapa primitiva de formación, que consiste en la acreción de planetesimales ricos en esta sustancia. Teniendo en cuenta la baja masa que tiene Marte, se infiere que el planeta no pudo haber adquirido muchos de ellos.

El otro proceso, considerado como el más probable, pudo haber ocurrido cuando Marte se encontraba en la sazón de su formación. Se trata de impactos de cometas y asteroides pequeños provenientes de regiones más externas y ricos en agua que le entregaron la sustancia al planeta⁵⁰.

En el año 2018, se comunicó el resultado de una investigación cuando anunciaron la posible existencia de un lago subterráneo en Marte⁵¹. Se trata de una gran masa de agua localizada bajo su helado polo sur. Sin embargo, la comunidad científica recomendó contar con más observaciones para poder respaldar tal conclusión, dado que entre los años 2012 y 2015 solo se obtuvieron 29.

En el año 2020, miembros de otra investigación reportaron evidencias de presencia de agua en Marte. Reforzaron la idea del lago antes mencionado y propusieron que podría haber tres más localizados a su alrededor (se estima que la región abarca 75000 km²). Este estudio contó con 135 observaciones realizadas entre los años 2012 y 2019, casi un 80% más que las que tuvieron disponibles en 2018.

El método de investigación que utilizaron consiste en la emisión de ondas de radio hacia Marte. Por naturaleza electromagnética, se comportaron de distintas maneras cuando se encontraron con los diferentes materiales marcianos. Rebotaron tanto en la superficie como también en capas subterráneas y emprendieron así su viaje hacia el detector. Las ondas recibidas están asociadas con los materiales con los que chocaron, ya que les imprimieron diferentes características. Esto permitió estudiar la composición de esa zona del planeta y los científicos concluyeron que hay agua líquida bajo más de 1 km de hielo⁵².

Para visualizar un poco mejor la física involucrada en ese método, podemos pensar en el choque de una persona contra una cama elástica y, por otro lado, contra una pared. Las características de los dos movimientos de la persona que rebota en ambos materiales son muy diferentes. Aunque esta situación poco tiene que ver con lo que experimentan las ondas, puede ayudar a entender la idea general.

¿Qué condiciones físicas pudieron haber permitido que haya agua líquida allí? Esta es una pregunta que continúa en discusión y que lleva a muchos científicos a dudar de la interpretación de los datos obtenidos.

Para que pueda existir agua en estado líquido en la superficie de Marte, se necesitaría una determinada presión que su atmósfera no puede generar. Por eso, esto no podría ocurrir en esa región del planeta.

Hace años existe la idea de que podría haber quedado un remanente de agua atrapada bajo la superficie, originada hace billones de años cuando el planeta tenía mares y lagos -en el capítulo 4 se desarrolla la historia de esta sustancia en Marte desde una perspectiva geológica y astrobiológica-. En la profundidad a la que podría encontrarse esta gran masa de agua, se estima que la temperatura es un poco más elevada que en la superficie por estar en el interior del planeta. Sin embargo, no sería suficiente para mantenerla en estado líquido, por lo que se considera que debe tener un alto contenido de sal.

Se continúa debatiendo si podría existir vida en Marte, aún en las condiciones extremas descritas. Un científico ambiental expuso que podría desarrollarse en lagos con concentraciones de sal cinco veces mayores que las de los mares terrestres. En cambio, propone que no sería posible si la concentración fuera veinte veces mayor. Por otro lado, un investigador perteneciente a un grupo de microbiología en ambientes helados comparó los posibles lagos subterráneos de Mar-

⁴⁸ Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 24.

⁴⁹ Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 25.

⁵⁰ Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 189.

⁵¹ O'Callaghan Jonathan, Water on Mars: discovery of three buried lakes intrigues scientists <https://doi.org/10.1038/d41586-020-02751-1>, 2020.

⁵² O'Callaghan Jonathan, Water on Mars: discovery of three buried lakes intrigues scientists <https://doi.org/10.1038/d41586-020-02751-1>, 2020.

te con el agua presente en la Antártida y destacó que allí no hay mucha vida activa⁵³.

Propiedades físicas y orbitales

Marte se encuentra a una distancia promedio del Sol de 1.5 UA⁵⁴. UA es una unidad de medida de longitud, Unidades Astronómicas, tal que 1 UA equivale a la distancia promedio entre el Sol y la Tierra⁵⁵. Su órbita alrededor de la estrella es la segunda más elíptica del Sistema Solar, dado que su excentricidad es más grande que la de los demás planetas, excepto Mercurio⁵⁶. Recorrerla le toma 687 días terrestres⁵⁷, que equivale a un año marciano.

Cuando Marte se encuentra cerca del perihelio y la Tierra del afelio, se produce el máximo acercamiento entre los dos planetas. Esto ocurre aproximadamente cada 17 años, en las llamadas oposiciones perihélicas⁵⁸.

Respecto de su movimiento rotacional, se observa que un día solar marciano tiene 24^h 39^m 35^s. Asombrosamente dura apenas más que un día solar terrestre, que está definido para que sea exactamente de 24^h⁵⁹.

La inclinación del ecuador marciano respecto del plano de su órbita es de 25.2°. A modo de comparación, la de la Tierra es de 23.4°⁶⁰. Esta última suele estar representada en los globos terráqueos, dado que no es un detalle menor. Gracias a este parámetro, tanto en Marte como en la Tierra se experimentan las cuatro estaciones: primavera, verano, otoño e invierno.

En aproximación, el tamaño del planeta rojo es la mitad que el terrestre, pues su radio es de 3390 km. Su masa, cuyo origen nos ha llevado numerosas líneas de discusión, es diez veces menor que la de nuestro planeta⁶¹. Sin embargo, como ya hemos visto, tienen una densidad similar.

La gravedad que experimentaría una persona en la superficie marciana es 62.5% menor que en la Tierra⁶². Eso le permitiría saltar más alto allí que aquí. Además, su peso en Marte sería menor que el que podría medir en una balanza situada en la superficie terrestre.

Amartizaje

En esta época de la historia entendimos que la Tierra es nuestra génesis, pero que nos rodean sitios en los cuales nos podemos expandir, como Marte. Continuemos explorando, admirando la naturaleza y evolucionando.

El futuro está allí y lo estamos persiguiendo.

“Bienvenidos serán cuando descendan de la nave: mi suelo rojizo continua a la espera de sus huellas, mientras que los rovers trabajan en los detalles de su visita. Las lunas, impacientes bailarinas, recorren el cielo en busca de su avistaje.

No aparten la vista de esta órbita vecina. Pronto se convertirán, entonces, en una especie interplanetaria del Sistema Solar.”

⁵³ O'Callaghan Jonathan, Water on Mars: discovery of three buried lakes intrigues scientists <https://doi.org/10.1038/d41586-020-02751-1>, 2020.

⁵⁴ Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 19.

⁵⁵ Comins Neil F. y Kaufmann Willian J., Discovering the universe, Editorial W. H. Freeman and Company, Estados Unidos, 2014; página 54.

⁵⁶ Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 2.

⁵⁷ Williams David R., <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>, 2019.

⁵⁸ Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 21.

⁵⁹ Barlow Nadine, Mars: An introduction to its interior, Surface and Atmosphere. Editorial Cambridge University Press, Reino Unido; página 22.

⁶⁰ Williams David R., <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>, 2019.

⁶¹ <https://solarsystem.nasa.gov/planets/mars/in-depth/>



Meteorología del Espacio y la exploración de Marte

Por Francisco A. Iglesias¹

1. Antes de viajar consulte el pronóstico: *Breve introducción a la meteorología del espacio*

Mucho antes de los impresionantes descubrimientos y del cambio de paradigma producidos principalmente durante la era espacial, los humanos pensábamos que la Tierra viajaba alrededor del Sol inmersa en un espacio casi vacío, frío e imperturbable. En contraste con esta idea, hoy sabemos que este *espacio exterior*, que se extiende más allá de la atmósfera de la Tierra, es, en realidad, un entorno muy complejo en el que interactúan las más variadas partículas subatómicas y campos magnéticos, provenientes, sobre todo de nuestra estrella madre, el Sol. De manera análoga con lo que ocurre con los huracanes en la Tierra, las condiciones del espacio exterior pueden cambiar de manera súbita a causa de fenómenos que se encuentran entre los más violentos y espectaculares del sistema solar, que afectan a seres vivos y a diversas tecnologías críticas para la exploración espacial y para el funcionamiento diario de la sociedad moderna.

La rama de las ciencias que estudia estos fenómenos, denominada Meteorología del Espacio² (ME), surgió a mediados del siglo XIX para comprender la influencia que tiene la actividad del Sol sobre la Tierra, en particular sobre su campo magnético, su atmósfera alta y el espacio exterior cercano³. Esto incluye posibles efectos perjudiciales

sobre artefactos y seres vivos, localizados tanto en la superficie y en la atmósfera de nuestro planeta, como en sus diversas órbitas útiles. Sin embargo, con el paso de los años y, a medida que nuestra especie y su tecnología se aventuró cada vez más lejos de su planeta natal, el campo de estudio de la ME se fue expandiendo para contemplar también las condiciones del espacio interplanetario, hasta los confines del sistema solar y, en especial, en destinos de misiones de exploración robóticas o tripuladas, como son la Luna o Marte.

En el presente capítulo revisaremos los extraordinarios fenómenos naturales y mecanismos físicos que hacen al estudio de la ME. Luego de una breve introducción histórica (Sec. 1), comenzaremos por describir la espectacular y muchas veces violenta actividad del Sol, el astro que domina el destino de todos los planetas del sistema (Sec. 2). Nuestra estrella es el principal motor de la ME, por lo que analizaremos de manera detallada los efectos de su actividad sobre la Tierra, sus habitantes y su tecnología (Sec. 3). Luego, compararemos estos efectos con aquellos que ocurren lejos de la Tierra en el medio interplanetario y en Marte (Sec. 4). Esto nos permitirá entender por qué el estudio de la ME no solo ha sido de fundamental importancia en el pasado para el exitoso desarrollo de los sistemas de comunicaciones terrestres y de la actividad espacial entre otros, sino que resulta absolutamente imprescindible para salvaguardar el correcto funcionamiento de nuestra sociedad tecnológico-dependiente actual, y para cualquier intento futuro de exploración tripulada del sistema solar (Sec. 5).

¹ Miembro de la Carrera del Investigador Científico de CONICET y del Grupo de Estudios en Heliofísica de Mendoza (GEHMe). Profesor del departamento de electrónica de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina.

² Otro término comúnmente utilizado en español es Clima del Espacio (o Clima Espacial), aunque son formalmente diferentes, ya que la ME estudia cambios en el medio espacial de duración más corta (minutos a meses) y de ocurrencia más irregular e impredecible.

³ Dos muy buenos libros de divulgación sobre el Sol y la ME escritos por investigadores argentinos, son: - **Marta Rovira**, *El Sol*, 1ª Ed., Eudeba, Buenos Aires, Argentina, 2007. - **Sergio Dasso**, *Los Enigmas del Sol*, 1ª Ed., Ediciones Cooperativas, Buenos Aires, Argentina, 2005 (disponible gratis en <http://spaceweather.at.fcen.uba.ar/2/lamp/divulgacion.html>). En inglés, una lectura recomendable es: **Kenneth R. Lang**, *Sun, Earth and Sky*, 2ª Ed., Springer, MA, USA, 2006.



Figura 1a

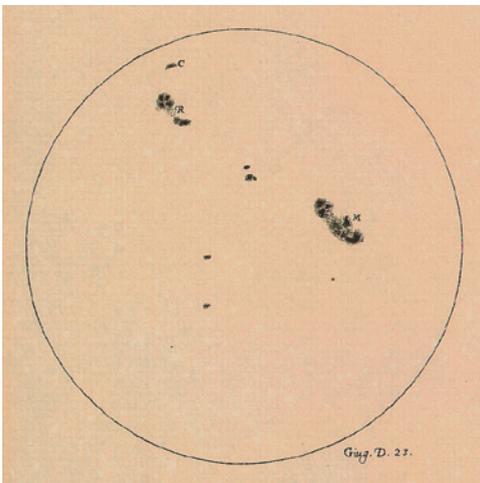


Figura 1b



Figura 1c

Observaciones antiguas de manchas solares: El primer dibujo conocido de una mancha solar por J. Worcester en 1157 (a, Oxford University). Dibujo de manchas solares por G. Galilei, realizado a partir de la utilización de uno de los primeros telescopios en 1612 (b, Galileo Project). Detallado dibujo de una mancha solar por S. Langley, realizado utilizando un telescopio de 33 cm de apertura en 1873 (c, Allegheny Observatory).

Históricamente, la ME comienza a desarrollarse con los primeros descubrimientos de un nuevo vínculo entre el Sol y la Tierra, uno que va más allá del lazo meramente gravitatorio descrito por Isaac Newton en su ley de gravitación universal de 1687. Esta relación Sol-Tierra involucra el intercambio de materia en forma de partículas cargadas eléctricamente, de radiación y, en especial, una interacción entre los campos magnéticos de ambos cuerpos. La ME permitió relacionar por primera vez la ocurrencia e intensidad de distintos fenómenos observados en el Sol, con otros eventos registrados en la Tierra que no presentaban una conexión evidente entre sí⁴.

Por un lado, observaciones del Sol revelaban la ocurrencia de fenómenos transitorios de variadas duraciones que rompían con el antiguo paradigma de una estrella calma e inmutable. La primera manifestación que se conoció de la actividad del Sol es la aparición y desaparición de zonas oscuras en su superficie, denominadas manchas solares (Figura 1). Utilizando observaciones y registros del número de estas manchas presentes en el sol, los astrónomos H. Schwabe y luego R. Wolf, respectivamente, sugieren, hacia 1843, que estas manchas aparecen de manera periódica, siguiendo un ciclo de aproximadamente 11 años. La primera detección de actividad solar abrupta fue realizada en paralelo por los astrónomos ingleses R. Carrington y R. Hodgson en 1859. Durante mediciones rutinarias de manchas solares en las que se utilizó un telescopio que permite la observación indirecta al proyectar el disco solar sobre una base de dibujo, Carrington presenció y registró un extraño y potente brillantamiento dentro de una mancha solar, que duró unos escasos 20 segundos (Figura 2a). Otros signos de actividad solar son las variaciones en las estructuras que se hacen visibles alrededor del Sol durante un eclipse total, en el que la Luna cubre por completo el brillante disco solar y deja en evidencia su tenue atmósfera externa, denominada corona. Al comparar las primeras fotografías tomadas durante un eclipse por los astrónomos W. de la Rue y A. Secchi en 1860, se pudo constatar que la corona y otras estructuras más pequeñas denominadas protuberancias son de naturaleza solar (Figura 2b). Además, durante el mismo eclipse, diversos astrónomos observaron un misterioso rasgo de gran escala en la corona, con una peculiar forma de cilindro circular, que, posiblemente, sea el primer registro que se conoce de una tormenta solar (Figura 2c).

Por otro lado, en la Tierra, diversos fenómenos naturales con efectos tecnológicos ocurrían sin que pudieran ser explicados. El primero que merece ser destacado es la aparición de extrañas y coloridas cortinas de luces en el cielo nocturno a altas latitudes, cerca de los polos terrestres (Figura 3a). Estas auroras boreales o australes, según se observen en el hemisferio norte o sur respectivamente, han maravillado e intrigado a los seres humanos desde tiempos muy antiguos. Hay registros que datan de la época de Aristóteles en el siglo IV antes de Cristo. Otro fenómeno terrestre de fundamental importancia para la ME son las variaciones abruptas detectadas en el campo magnético de la Tierra. La invención de la brújula en China durante el siglo XI y su uso extendido en navegación derivó en que el médico y físico inglés W. Gilbert propusiese en 1600 que la Tierra tiene un campo magnético global de dos polos, similar al de un gran imán cuyo eje magnético se encuentra congelado dentro del planeta. Esta idea se basó en sus experimentos en los que utilizó un imán esférico de unos 30 cm que llamó *terrella* (pequeña tierra, en latín) y pequeñas barras magnéticas que simulaban la orientación de la brújula en diferentes puntos del globo (Figura 3b). Un siglo y medio después, en 1741, los astrónomos O. Hiorter y A. Celcius, junto con el fabricante de relojes de Londres G. Graham, vinculan el comportamiento errático de la aguja de la brújula observado por primera vez en 1722 por Graham, con la ocurrencia de las auroras. Esto fue estudiado con más detalle por el explorador

⁴ George Siscoe, Space weather forecasting historically viewed through the lens of meteorology, en Space Weather: Physics and Effects. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Alemania, 2007 (en inglés).

Alemán A. von Humboldt durante una aurora de 1807. Más adelante, utilizando una red casi global de muchos observatorios magnéticos financiada por el zar ruso Nicolás I, von Humboldt ratifica la asociación entre la ocurrencia de las auroras y las perturbaciones de gran escala del campo magnético terrestre, que denominó *tormentas geomagnéticas*.

A mediados del siglo XIX comienzan a descubrirse y explicarse relaciones causales entre los fenómenos solares y terrestres nombrados arriba, que evidencian un nuevo tipo de conexión Sol-Tierra y dan origen al campo de la ME.

En 1851, el astrónomo y geofísico E. Sabine observa que la frecuencia e intensidad de las perturbaciones del campo magnético terrestre son mayores cuando aumenta el número de manchas solares. La misma relación se estableció con las auroras, es decir que su ocurrencia también sigue el ciclo de manchas solares de 11 años. Carrington también sospecha de una relación Sol-Tierra debido a que 18 horas después de su observación de la primera fulguración solar en 1859, se registró una enorme tormenta geomagnética en el observatorio de Kew y aparecieron brillantes auroras alrededor del globo a latitudes tan bajas como en el caribe colombiano.

A partir de ideas previas de otros investigadores, el físico noruego K. Birkeland propone en 1896 un posible mecanismo para explicar la influencia del Sol sobre el magnetismo terrestre y la ocurrencia de auroras. Mediante un experimento que involucra bombardear con electrones una terrella como la de Gilbert (Figura 3b), cubierta de pintura fosforescente para indicar dónde impactan las partículas, Birkeland pudo reproducir muchas de las características observadas en las auroras. Esto lo llevó a hipotetizar que un chorro de electrones es emanado del Sol y que, al impactar con la Tierra, es desviado por el campo magnético terrestre hacia los polos donde produce las auroras. Una crítica a esta idea era que tal chorro de electrones solares sería incapaz de alcanzar la Tierra, pues la repulsión eléctrica entre ellos tendería a dispersarlos. Por lo que, en 1930, los investigadores S. Chapman y V. Ferraro sugieren que las tormentas geomagnéticas y sus auroras asociadas son producidas cuando una nube de gas ionizado neutro, es decir una masa de plasma que contiene tanto cargas positivas como negativas, alcanza la Tierra e interactúa con su campo magnético. En ese tiempo, no estaba claro si este flujo de partículas era constante, una especie de viento solar uniforme o únicamente transitorio, en forma de chorros intermitentes. Fue E. Parker quien en 1958 desarrolló cuidadosamente la idea de un viento solar formado por gas ionizado que es emanado por el Sol de forma constante y derivó sus principales propiedades físicas. Este viento solar parte del Sol hacia el espacio interplanetario de forma radial, lo que, al considerar la rotación solar, llevó a Parker a anticipar que las líneas del campo magnético del Sol deben formar una espiral, (similar a la formada por el flujo de agua en un regador de jardín giratorio).

Con el advenimiento de las primeras tecnologías basadas en electricidad, susceptibles a efectos magnéticos, comenzaron a registrarse eventos de mal funcionamiento asociados a los fenómenos de la ME. Los primeros efectos tecnológicos de gran escala se detectaron en sistemas de comunicación telegráficos durante la ocurrencia de auroras a partir de 1847. En el evento observado por Carrington en 1859 hubo interrupciones simultáneas del telégrafo en al menos 52 ciudades de muchos países. Luego, en 1940, el mismo problema se observó en redes de comunicación telefónica y, más tarde, en cables de comunicaciones submarinos trasatlánticos. Al introducirse las comunicaciones inalámbricas, que hacen uso de ondas de radio, se hizo evidente de inmediato su susceptibilidad a la actividad magnética, fenómeno observado por el mismísimo G. Marconi en 1866. Las más afectadas son las comunicaciones radiales de larga distancia, que ven severamente disminuido o incluso interrumpido su funcionamiento

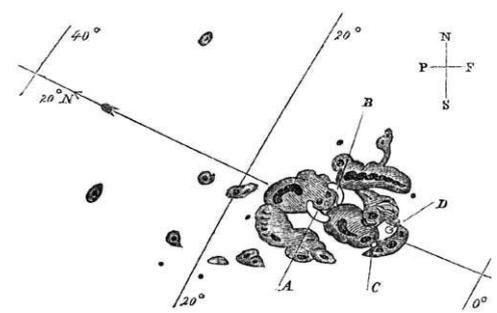


Figura 2a

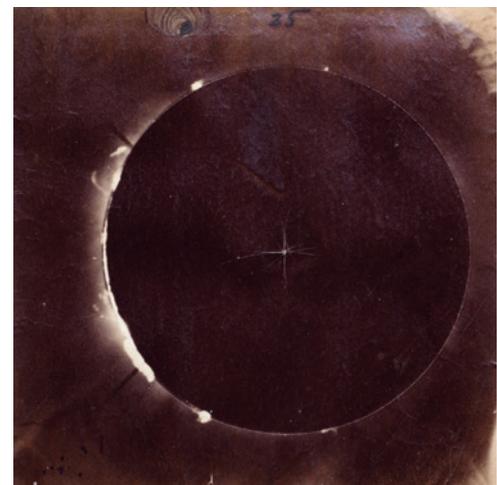


Figura 2b

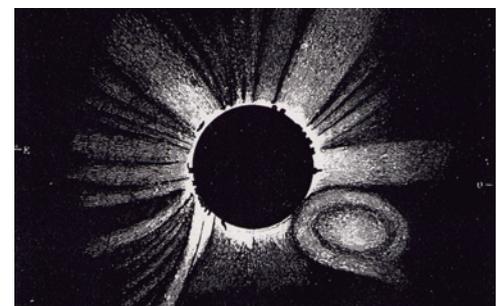


Figura 2c

Primeros registros de la actividad solar: Diagrama de una mancha solar realizado por R. Carrington en el que indica las zonas (A–D) donde observó por primera vez súbitos abrambramientos (una fulguración solar) de muy corta duración (a, Royal Astronomical Society). Fotografía del Sol por W. de la Rue durante el eclipse total de 1860, donde pueden apreciarse protuberancias solares en el borde superior izquierdo (b, Science Museum London). Dibujo realizado por G. Tempel durante el mismo eclipse en el que muestra en blanco la estructura extendida de la corona solar y un misterioso rasgo de forma circular en la parte inferior derecha (c, High Altitude Observatory).



Figura 3a

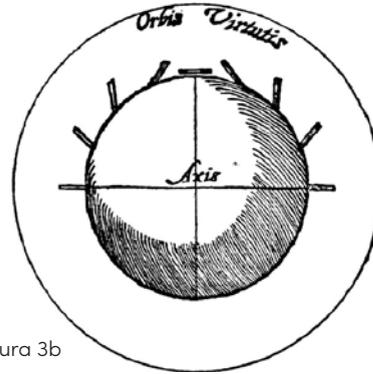


Figura 3b

Magnetismo terrestre:

Pintura de Frederic Church de 1865 que ilustra una bella aurora boreal sobre el océano (a, Smithsonian American Art Museum, Gift of Eleanor Blodgett). Esquema original de W. Gilbert que muestra el estudio del campo magnético en una terella mediante pequeñas barras magnetizadas (b, Chapman and Bartels 1940, OUP).

durante tormentas geomagnéticas. Otras industrias susceptibles a la actividad solar son las de distribución eléctrica y la satelital. En la primera, corrientes geomagnéticas inducidas en los largos conductores pueden destruir equipos y protecciones, fenómeno registrado por primera vez en 1940 en Norte América. Los efectos nocivos de la ME en satélites se hicieron manifiestos ya desde el inicio de la actividad espacial. Como la primera víctima puede considerarse el tercer satélite estadounidense, el Explorer III, que sufrió una destrucción de sus contadores de partículas y lo que derivó en el descubrimiento de los anillos de radiación de Van Allen (ver más abajo). Las partículas cargadas de alta energía, que se mueven a gran velocidad, pueden producir el malfuncionamiento o destrucción de todo tipo de artefactos en órbita terrestre, incluidos satélites meteorológicos, de comunicaciones o de posicionamiento global.

Si bien a principios del siglo XX ya se habían observado relaciones básicas entre la actividad del Sol y los fenómenos en la Tierra descritos arriba, las explicaciones detalladas de los mecanismos físicos subyacentes eran escasas. Esto comenzó a cambiar con el advenimiento de la era espacial. Por primera vez, pudieron estudiarse in situ las propiedades del espacio cercano a la Tierra, y realizar novedosas observaciones remotas de fenómenos solares. El primer gran logro llegó de inmediato con el primer y tercer satélite estadounidense, Explorer I y III, que permitieron que su creador, J. Van Allen, descubriera en 1958 la presencia de zonas en el espacio exterior cercano a la Tierra que presentan una alta concentración de partículas cargadas. Estas zonas, que tienen forma de toroide (o dona) y se denominan Cinturones de Van Allen, son alimentadas por partículas provenientes del viento solar. Otro crucial avance fue la verificación de la existencia del viento solar, detectado in situ por las sondas soviéticas Luniks 2 y 3 en 1959 que confirmaron las predicciones de Parker. Luego, en 1962, mediciones continuas realizadas por la misión Mariner 2 demostraron que el viento solar no es un flujo constante uniforme, si no que presenta corrientes esporádicas de mayor velocidad. Las ideas de Chapman y Ferraro sobre nubes de plasma transitorias viajando desde el Sol hacia la Tierra fueron finalmente corroboradas con la observación inequívoca de la primera tormenta solar en 1971 por los satélites OSO y Skylab. Estas misiones incluían un novedoso instrumento de observación del Sol, que oculta el brillante disco solar para poder fotografiar su tenue atmósfera externa, la corona. Como veremos en las próximas secciones, estos coronógrafos son instrumentos fundamentales para entender las tormentas solares que son uno de los principales moduladores de la ME.

2. El origen de la tormenta: *el Sol como motor de la ME*

Para comprender las causas y consecuencias de la ME, debemos entender primero el funcionamiento básico del Sol⁵ y, en especial, las principales manifestaciones de su actividad magnética. El concepto de espectro electromagnético es crucial para entender cómo es posible estudiar el Sol a la distancia, de forma remota, utilizando telescopios. La luz es radiación electromagnética que se propaga en el espacio en forma de onda. Como todo efecto ondulatorio, posee una rapidez de oscilación denominada frecuencia y una extensión espacial denominada longitud de onda. La longitud de la onda es la distancia entre dos crestas sucesivas, por lo que se mide en unidades como metros (m), micrómetros (μm) o nanómetros (nm), y es lo que los humanos interpretamos como el color. La luz puede descomponerse en función de su longitud de onda (sus colores constituyentes) con la utilización de, por ejemplo, un prisma. El rango de todas las posibles longitudes de onda se denomina espectro electromagnético. Nuestros ojos evolucionaron para registrar radiación electromagnética solamente en un rango muy limitado de longitudes de onda⁶, que se denomina espectro visible: a esta radiación la llamamos luz. Para longitudes de onda más cortas, encontramos radiación electromagnética que es invisible a nuestros ojos, como la radiación ultravioleta, los Rayos X y la radiación gamma. Para longitudes de onda más largas, encontramos radiación infrarroja, las microondas y las ondas de radio usadas en comunicaciones, todas también invisibles para nosotros. Lo importante

⁵ Marta Rovira, El Sol, 1ª Ed., Eudeba, Buenos Aires, Argentina, 2007.

⁶ Que coincide con la porción del espectro electromagnético en la que el Sol es más brillante.

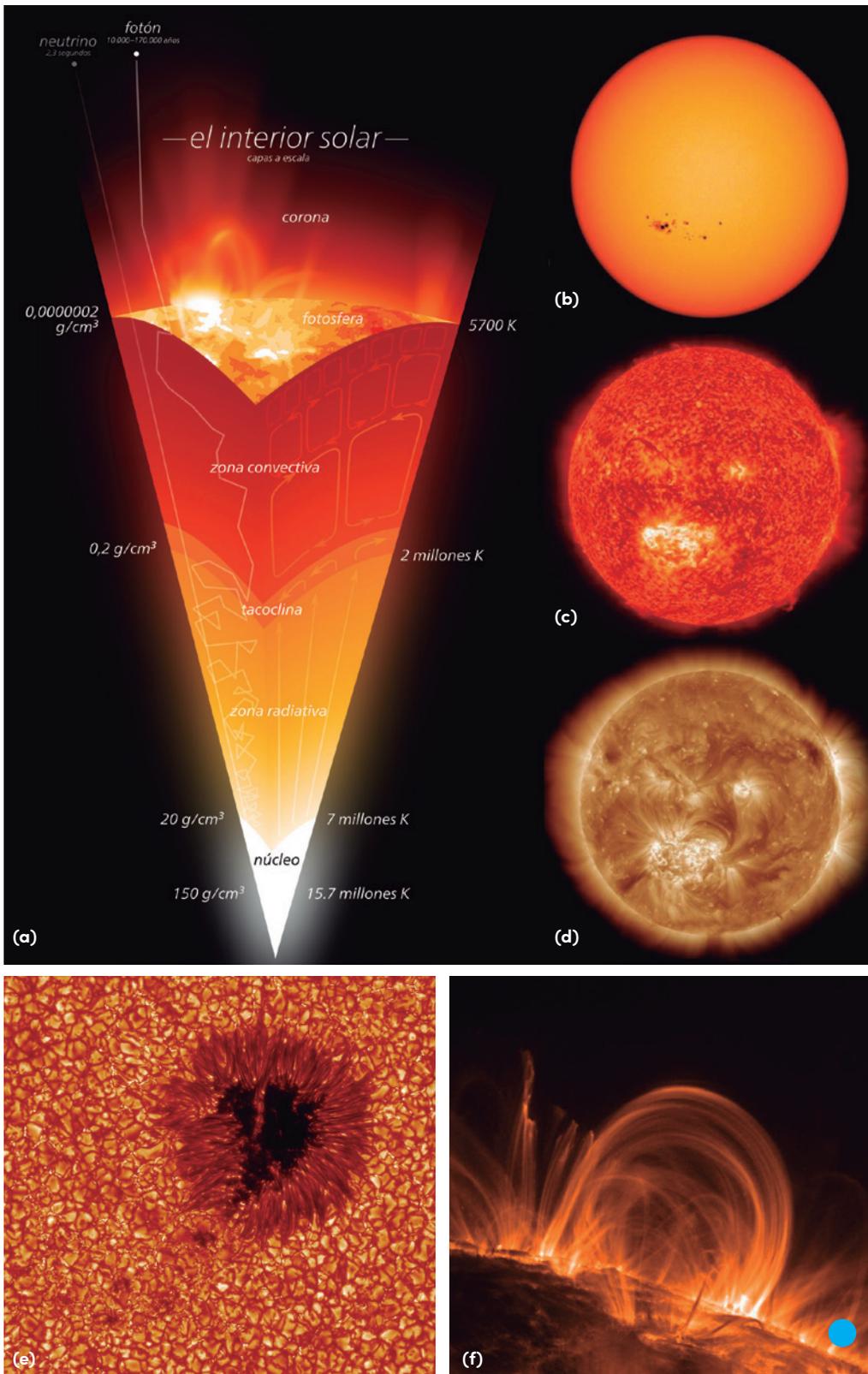


Figura 4

Estructura básica del Sol:

Esquema que muestra las diferentes zonas del interior solar y que incluye valores aproximados de temperaturas y densidades (a, Wikipedia/Kelvinsong). Fotografías de la atmósfera solar que muestran la fotosfera en el continuo del espectro (b, NASA/SDO), la cromosfera en 30.4 nm (c, NASA/SDO), y la corona en 19.3 nm (d, NASA/SDO). Fotografía de una mancha solar del tamaño de la Tierra aproximadamente, rodeada por gránulos solares (e, The Royal Swedish Academy of Sciences). Fotografía de lazos coronales observados por sobre el limbo solar: el círculo azul representa el tamaño real de la Tierra. (f, NASA/SDO)

es que todas estas radiaciones, visibles o no, son el mismo fenómeno, una onda electromagnética. Otro concepto clave es que las ondas electromagnéticas interactúan con la materia de acuerdo con su longitud de onda y el elemento químico que compone esa porción de materia. Así, cada elemento químico conocido absorbe o emite luz precisamente a una longitud de onda específica⁷. Esto permite estudiar la composición química de un objeto o gas distante, simplemente analizando el espectro de la luz que emite o absorbe. Así, al observar el Sol con filtros de diferentes colores (longitudes de onda) específicos, podemos estudiar las diferentes capas de su atmósfera, pues estas están compuestas por diferentes elementos químicos a distintas temperaturas.

El Sol es una estrella de mediana edad, bastante común entre las otras 100.000.000.000 (cien mil millones) de estrellas que pueblan nuestra galaxia, la Vía Láctea. Sin embargo, es un astro muy especial para la raza humana, puesto que nuestro planeta Tierra se encuentra bajo el dominio del Sol. Esto es cierto no solo desde un punto de vista gravitatorio, con más de 99.8% de toda la masa del sistema solar concentrada en el Sol, sino también energético. El Sol ha provisto la mayoría de la energía que recibe la Tierra de forma ininterrumpida por alrededor de 4.600 millones de años, posibilitando la evolución de la vida como la conocemos. El Sol es también muy importante desde un punto de vista astronómico, puesto que es la única estrella que podemos observar con gran detalle. Los telescopios más modernos son capaces de fotografiar estructuras en la superficie solar de tan solo 40 km de extensión, lo que representa una minúscula fracción del diámetro del Sol, que tiene unos 1,39 millones de km (aproximadamente 109 veces el diámetro de la Tierra).

Como muchas otras estrellas, el Sol es una esfera gigante (alrededor de 1.3 millones de Planetas Tierras podrían acomodarse en su

⁷ La longitud de onda de la luz emitida o absorbida cambia también con la temperatura (grado de ionización) y velocidad de movimiento de la porción de materia con la que interactúa.

interior) de plasma⁸ que genera energía en su núcleo mediante una reacción nuclear. En el interior del Sol se distinguen diferentes zonas de acuerdo con cuál es el principal mecanismo de transporte de la energía (Figura 4a). La presión y temperatura (15.7 millones de grados) en el núcleo son tan grandes que los átomos de hidrógeno (que son más del 92% del total de átomos en el Sol) colisionan a altas velocidades y se fusionan. Como resultado de esta fusión nuclear, se crean átomos de helio y se libera una gran cantidad de energía en forma de radiación electromagnética gamma. Los fotones⁹ gamma escapan del núcleo hacia la superficie en un viaje que dura más de 10 mil años a través de las zonas radiativa y convectiva, en el que son absorbidos y reemitidos una gran cantidad de veces antes de alcanzar la fotosfera. La fotosfera está a unos 5.700 grados de temperatura y constituye la superficie visible del Sol por debajo de la cual no podemos ver. La fotosfera puede observarse en luz blanca (Figura 4b), en ella se distinguen en especial las manchas solares (Figura 4e), que son regiones del Sol más frías por lo que aparecen oscurecidas. La temperatura en las manchas es menor debido a que son zonas donde hay presente una concentración de campo magnético muy intenso, que restringe el movimiento del plasma¹⁰ y que inhibe, así, la transferencia de calor desde el interior de la estrella. Además de las manchas solares, que surgen en distintas regiones de la superficie de acuerdo con el ciclo solar de once años, toda la fotosfera se encuentra completamente cubierta por celdas hexagonales de unos 1300 km de extensión promedio, denominadas gránulos solares (Figura 4e). Los gránulos están en permanente cambio, aparecen y desaparecen cada 5-15 min, y revelan la acción convectiva de la capa inferior, similar a lo que se observa en una olla de agua hirviendo. En el centro brillante de los gránulos, el plasma caliente se eleva hacia la superficie y, luego de enfriarse, este plasma se sumerge en los bordes intergranulares más oscuros. La fotosfera tiene unos 200 km de espesor y es considerada también la capa más inferior de la atmósfera solar. La atmósfera del Sol se divide en cuatro capas de acuerdo con los diferentes regímenes de temperatura y densidad observados en ellas. Por sobre la fotosfera se encuentra una capa de 2000 km de espesor denominada cromosfera (Figura 4c), que presenta un leve incremento de la temperatura hasta llegar a los 7000 grados. Más arriba, se observa un abrupto incremento de temperatura y reducción de la densidad en una capa conocida como la región de transición, que es seguida por la capa más externa de la atmósfera solar denominada corona (Figura 4d). La impresionante temperatura a la que se encuentra la corona del Sol, alrededor de un millón de grados, no tiene explicación en la actualidad y es el enigma abierto más importante de la física solar. Debido a esta alta temperatura, el plasma de la corona se expande de mane-

ra constante y produce lo que se conoce como viento solar. El viento solar es un flujo permanente de partículas cargadas, como protones y electrones, que emana desde el Sol hacia el espacio interplanetario en todas direcciones. Este viento acarrea consigo campo magnético solar y forma lo que se conoce como el campo magnético interplanetario. Debido a la rotación del Sol, de aproximadamente 27 días, este campo interplanetario forma una espiral, denominada espiral de Parker (ver Sec. 1).

El Sol es muy activo: si se utilizan los instrumentos adecuados pueden observarse una gran cantidad de diversos fenómenos que ocurren en su atmósfera todo el tiempo. Como es el caso de las manchas solares, la mayor parte de esta actividad proviene de los cambios que experimenta el campo magnético del Sol, en diferentes escalas espaciales y temporales. A escala global, el campo magnético cambia de una manera muy regular pues invierte su polaridad de dirección norte a sur y viceversa cada 11 años (Figura 5a). Este ciclo fundamental regula toda la actividad en el Sol. Al comenzar el ciclo, el campo magnético presenta una configuración simple con dos polos relativamente bien definidos, como los de una barra imantada. Esto corresponde con un mínimo de actividad donde casi no se encuentran manchas solares ni se producen tormentas en el Sol. Al avanzar poco más de cinco años, se llega al máximo de actividad, en donde el campo magnético no tiene una orientación predominante, sino que se encuentra altamente desordenado. Durante el máximo, la frecuencia de aparición de manchas solares es muy alta, como también la ocurrencia de erupciones y tormentas solares. Además, se produce una inversión del campo magnético global para llegar, luego de once años, a un nuevo mínimo con la polaridad magnética revertida.

A escalas espaciales más pequeñas, las configuraciones que adopta el campo magnético del Sol y su interacción con el plasma producen una serie de rasgos característicos en la atmósfera. Por ejemplo, dado que se forman tubos de flujo magnético rellenos de plasma caliente, se hacen manifiestos los lazos o arcos coronales (Figura 4f). En la cromosfera pueden observarse estructuras magnéticas tubulares y elongadas de tamaño considerable (60 a 600 mil km). Al ser observadas sobre el disco solar, estas estructuras se denominan filamentos y se ven oscuras debido a que están rellenas con plasma más frío que el circundante. En cambio, cuando se observan fuera del disco, estas estructuras se ven brillantes y se denominan prominencias (Figura 5b). El campo magnético del Sol a escalas no globales, como el asociado a las manchas, filamentos o prominencias, puede cambiar y reconfigurarse de manera

⁸ Plasma es el cuarto estado de la materia y puede formarse al ionizar los átomos de un gas. Esto significa que los electrones se han separado de los núcleos por lo que hay cargas positivas y negativas libres de circular. La principal diferencia con respecto a un gas frío como el aire que usted está respirando es que un plasma permite la conducción de la electricidad y es afectado por campos magnéticos.

⁹ Además de ser una onda, la luz puede comportarse como una partícula, en especial cuando interactúa con materia. La radiación electromagnética es absorbida o emitida por los átomos en paquetes de energía indivisibles denominados fotones. Los fotones son las partículas elementales que transportan energía electromagnética.

¹⁰ Un concepto importante para entender muchos fenómenos solares es que un campo magnético suficientemente fuerte puede controlar el movimiento de un plasma, debido a que en este hay presente cargas eléctricas. Si las líneas de campo magnético adoptan una configuración en forma tubular, entonces el plasma puede quedar atrapado dentro, como sucede parcialmente en las manchas solares, los lazos coronales y los filamentos.

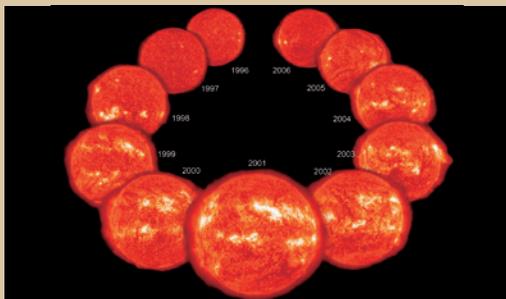


Figura 5a



Figura 5b

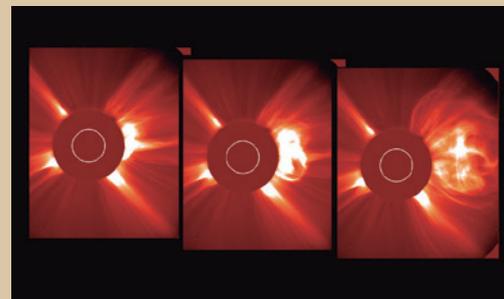


Figura 5c

Actividad solar: Composición de imágenes de la cromosfera tomadas durante un ciclo solar completo de 11 años, desde el mínimo en 1996, pasando por el máximo en 2001 y hasta el nuevo mínimo en 2006. (a, NASA). Imagen de una prominencia que erupciona y es desprendida de la corona solar hacia el medio interplanetario, el círculo azul representa el tamaño real de la Tierra (b, NASA/SDO). Recomendando ver el video en filament2.html o escaneando el QR de esta página. Secuencia de imágenes de coronógrafos que muestran la evolución de una Eyección Coronal de Masa. Note que el disco solar, delineado por el círculo blanco, está oculto para permitir visualizar la tenue corona (c, SOHO/ESA/NASA).



abrupta en solo unas horas o incluso minutos. Debido a que el movimiento del plasma en ciertas regiones de la atmósfera solar es en parte controlado por el campo magnético, estas reconfiguraciones pueden producir fulguraciones y erupciones solares. Las fulguraciones son los abramientos rápidos que fueron observados por Carrington en 1859, donde el campo magnético se reacomoda o reconecta en cuestión de minutos¹¹ y produce una aceleración de las partículas del plasma cercano, lo que se traduce en emisiones electromagnéticas en casi todas las longitudes de onda, desde el radio hasta los rayos X. Las erupciones solares son súbitos desprendimientos de grandes cantidades de materia desde el Sol hacia el medio interplanetario. Tal es el caso de la impresionante erupción de una enorme prominencia mostrada en la Figura 5b. Las erupciones solares más espectaculares y relevantes para la ME pueden observarse mientras se propagan por la corona solar y el medio interplanetario con la utilización de coronógrafos, que son instrumentos que permiten tomar fotografías de la corona solar gracias a que ocultan el brillante disco del Sol y simulan lo que sucede durante un eclipse total. Las erupciones vistas en los coronógrafos se denominan Eyecciones Coronales de Masa (ECM) o, popularmente, tormentas solares (Figura 5c). Las ECM son de los eventos más impresionantes y violentos del sistema solar, en el que se liberan descomunales cantidades de plasma (miles de millones de toneladas) y campo magnético a enormes velocidades, desde el Sol hacia el espacio en solo unas decenas de minutos. La ECM comienzan como una burbuja que se expande muy rápido y llegan a convertirse en estructuras enormes de varias veces el tamaño del Sol. Incluso pueden propagarse hasta los planetas exteriores del sistema solar. Considerando las velocidades de propagación, que van de 1 a 10 millones de km/h, una ECM desprendida desde el Sol con la dirección adecuada, requiere de 8 a 72 horas en alcanzar la Tierra. Como el resto de la actividad solar, la frecuencia de ocurrencia de las ECM varía según el ciclo solar y pueden registrarse en promedio hasta 4 eventos por día durante el máximo de actividad.

Como veremos en las próximas secciones, toda esta actividad solar es el principal motor de la ME, pues tiene consecuencias trascendentales en las condiciones del espacio interplanetario y en los planetas que se encuentran orbitando el Sol.

3. El mejor refugio: *La ME y sus efectos en la Tierra*

La relación Sol-Tierra está dominada por la interacción entre las principales manifestaciones de la actividad solar, como son el viento solar, las fulguraciones y las ECM, con el campo magnético y atmósfera de nuestro planeta. A la región del espacio alrededor de la Tierra dominada por el campo magnético terrestre, a partir de unos 500 km de altura sobre la superficie, se le denomina magnetosfera (Figura 6a). La magnetosfera es crucial para la vida en la Tierra y en especial para la sociedad moderna, pues actúa como un escudo protector que deflecta muchas de las peligrosas partículas energéticas cargadas provenientes del viento solar, fulguraciones y ECM, entre otros. Este escudo no solo nos protege de efectos nocivos para la salud y de daños a varias tecnologías críticas, sino que es fundamental para el funcionamiento de la atmósfera alta de la Tierra, con importantes implicaciones climatológicas. Debido a la continua presión que ejerce el viento solar sobre la magnetosfera, esta no es esférica, si no que tiene un frente achatado en dirección al Sol (hasta unos 70 mil km de la Tierra) que es donde se crea una onda de choque, y las partículas cargadas del viento solar son afectadas por el campo magnético terrestre que modifica de manera drástica su velocidad. En el lado nocturno, la magnetosfera es arrastrada por el viento solar que forma una cola alargada de hasta 300 mil km de largo. Los fenómenos de corta duración asociados a la ME son listados más abajo. Sin embargo, hay marcadas y regulares variaciones de más larga duración durante el ciclo solar de once años. Estas incluyen cambios en el espectro de la luz solar irradiada, en la presión del viento solar y en la estructura del campo magnético interplanetario,

¹¹ Este proceso de rápida reconfiguración del campo magnético es similar a lo que sucede al enroscar múltiples veces una banda elástica. Al soltarla, la banda se relaja de manera abrupta, vuelve a su forma original y libera energía en el proceso.

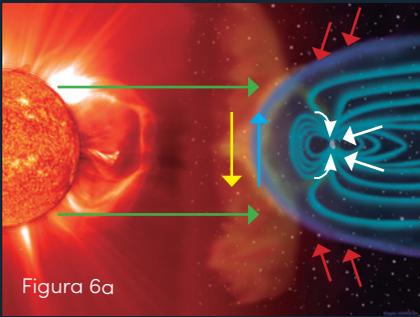


Figura 6a



Figura 6b



Figura 6c

ME en la Tierra: El esquema muestra al Sol y la Tierra (no a escala) con su magnetosfera en azul, impactada por una ECM (a, ESA & NASA). Las flechas blancas indican direcciones por las que las partículas solares penetran el escudo magnético cuando el campo magnético de la ECM (flecha amarilla) tiene dirección Sur, es opuesto al campo terrestre (flecha azul) y ambos se reconectan. Las flechas verdes y rojas simbolizan el arribo de partículas solares muy energéticas y de rayos cósmicos, respectivamente. Imagen de la Tierra tomada desde el espacio mientras tiene lugar una aurora austral (b, IMAGE/NASA). Diferentes auroras fotografiadas en el cielo nocturno de Islandia (c, Wikipedia/Schnuffel2002). Infografía de la agencia espacial europea (ESA) que esquematiza las principales consecuencias de la ME en la Tierra (d, ESA/Science Office).

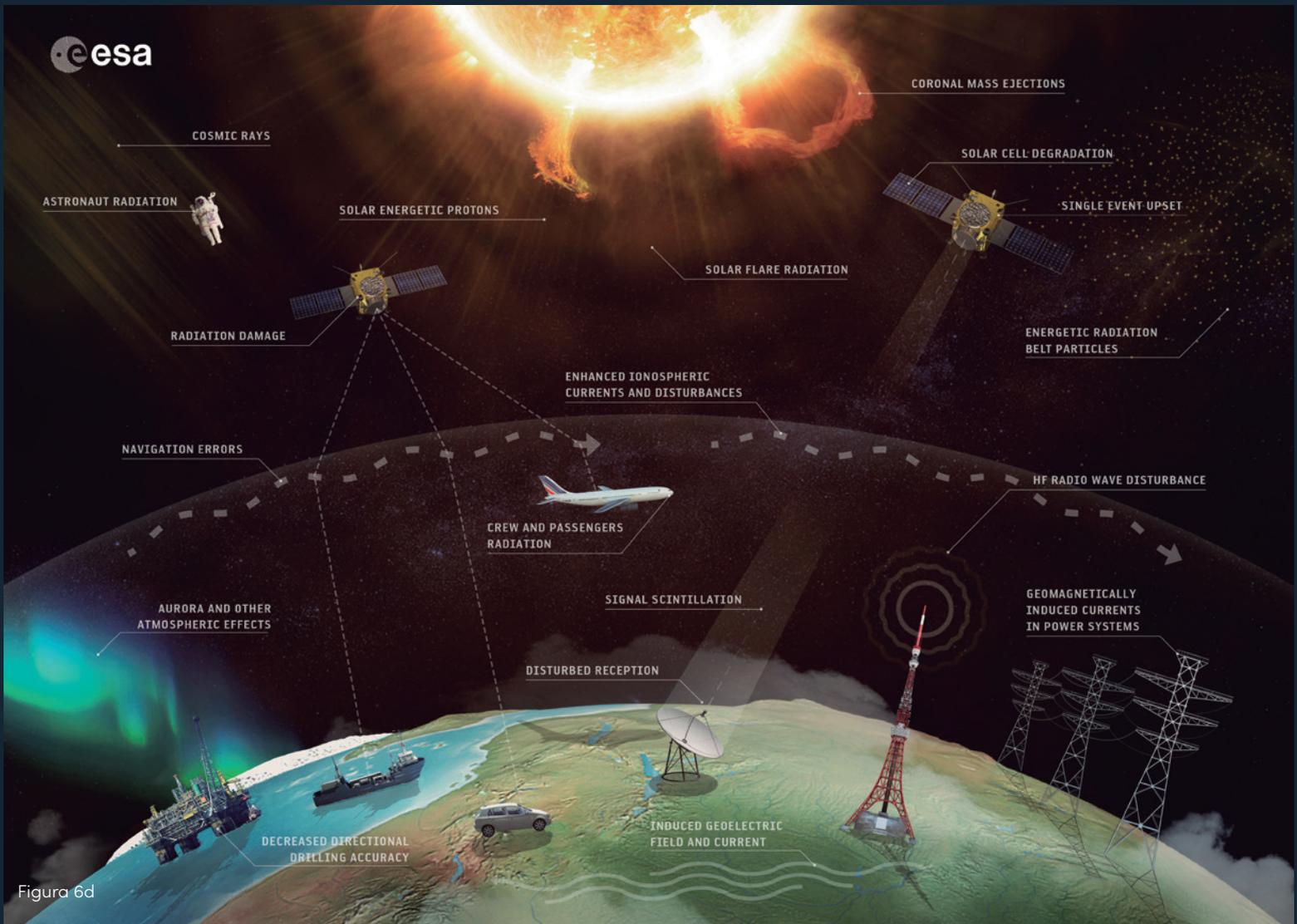


Figura 6d

que producen variaciones periódicas en la forma y estructura de la magnetosfera, en las propiedades de la alta atmósfera terrestre (como la capa de ozono o la ionosfera) y en el flujo de rayos cósmicos. Todo esto tiene efectos climatológicos en la Tierra. Los rayos cósmicos son partículas energéticas que llegan desde el espacio, los hay de origen solar, pero los más energéticos provienen de otras fuentes en nuestra galaxia o fuera de ella (Figura 6a). La magnetosfera deflecta y la atmósfera frena mediante colisiones los rayos cósmicos, lo que nos protege en gran medida. Durante el máximo del ciclo solar, el campo magnético interplanetario es más irregular y reduce marcadamente el flujo de rayos cósmicos que llega a la Tierra.

Las tres principales fuentes solares moduladoras de la ME y sus mecanismos de interacción con la magnetosfera son¹²:

- Perturbaciones en el viento solar: Cuando ocurre una perturbación del viento solar que trae aparejado variaciones abruptas de la densidad, velocidad y/o campo magnético, se puede producir un fenómeno de interacción magnética entre esta perturbación y la magnetosfera (Figura 6a). Para que ocurra esta interacción, se requiere que el campo magnético resultante en la perturbación esté preferentemente orientado de forma opuesta al campo de la magnetosfera, lo que facilita una reconexión de las líneas de ambos campos. Hay dos zonas principales de reconexión magnética, una inicial en el lado diurno de la magnetosfera y una secundaria en el lado nocturno. Fruto de estas reconexiones, en especial de la secundaria, la magnetosfera reduce momentáneamente su capacidad protectora, pues partículas cargadas del viento solar son inyectadas siguiendo las líneas del campo magnético terrestre e ingresando por ambos polos a la atmósfera baja.

Este es el mecanismo básico¹³ que produce fluctuaciones temporales en la intensidad del campo magnético global de la Tierra, conocidas como tormentas geomagnéticas. Los principales causantes de estas perturbaciones del viento solar cerca de la Tierra son la llegada de una ECM y eventuales ráfagas de viento solar rápido (de hasta 3 millones de km/h) provenientes de zonas específicas de la corona, denominadas agujeros coronales.

- Flujo de partículas solares energéticas: Cuando se produce una fulguración solar o durante la erupción y propagación de una ECM, pueden acelerarse gran cantidad de partículas cargadas a muy altas velocidades (fracciones de la velocidad de la luz). Algunas de estas partículas son tan energéticas que llegan a la Tierra en cuestión de minutos y pueden penetrar nuestro escudo protector para alcanzar órbitas bajas y la atmósfera, y producir una alta dosis de radiación (Figura 6a). Estas tormentas de radiación pueden durar unas pocas horas (cuando provienen de fulguraciones) o hasta varios días (cuando provienen de ECM que se propagan rápidamente en el espacio). Las partículas cargadas siguen las líneas del campo magnético, por lo que en el espacio son guiadas por el campo magnético interplanetario (la espiral de Parker). Dentro de la magnetosfera, estas partículas siguen al campo terrestre por lo que algunas pueden ingresar en la atmósfera a altas latitudes, cerca de los polos. Gracias a las colisiones y absorción de los gases de la atmósfera, esta radiación no alcanza la superficie.
- Radiación electromagnética: Además de la radiación de partículas, las fulguraciones y disparos de ECM producen la emisión de ondas electromagnéticas en una amplia porción del espectro que incluyen ondas de radio y luz visible, y otras más energéticas y nocivas para la salud, como luz ultravioleta, rayos X e incluso rayos gama. La mayor parte de esta radiación nociva es absorbida por la atmósfera de la Tierra, por lo que no alcanza la superficie. La radiación electromagnética es emitida en múltiples direcciones y viaja en línea recta por el medio interplanetario. En caso de que su fuente (fulguración o ECM) ocurra en dirección a la Tierra, esta radiación solo tarda unos ocho minutos en llegar a nosotros.

Por otro lado, los principales efectos atmosféricos, tecnológicos y para la salud de estos fenómenos de la ME son (Figura 6d):

- En la magnetosfera:
 - En Satélites artificiales y naves espaciales, el impacto de partículas energéticas produce el deterioro, malfuncionamiento y/o destrucción de paneles solares, equipos electrónicos e instrumentos. La afectación de las computadoras y sensores que controlan sistemas críticos, como navegación, comunicaciones o térmico, puede derivar en errores de funcionamiento y control o incluso en la pérdida total del equipo. Es muy común que impactos únicos de partículas en circuitos electrónicos como memorias o procesadores, produzcan la ejecución de comandos no deseados o comandos fantasmas. Además, las variaciones en el flujo de cargas eléctricas que impactan los satélites en su órbita durante un evento de ME, pueden producir la acumulación excesiva de carga en diferentes partes del aparato y resultar en descargas electrostáticas destructivas. Debido a esto, los servicios de predicción de la ME alertan a los controladores de satélites sobre cualquier evento solar potencialmente peligroso, para que ellos puedan poner la nave en un modo seguro, que es diseñado específicamente para reducir estos efectos dañinos.
 - La radiación en astronautas que no estén a resguardo dentro del cascarón protector de su nave espacial, por ejemplo, durante una actividad extra vehicular, puede acarrear efectos nocivos para la salud como vómitos, fatiga, bajo recuento de glóbulos rojos, enfermedades severas o incluso la muerte. El impacto de partículas de alta energía es capaz de arrancar electrones de los átomos y destruir

¹² Volker Bothmer y Andrei Zhukov, The Sun as prime source of space weather, en Space Weather: Physics and Effects. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Alemania, 2007 (en inglés).

¹³ Recomiendo al lector ver la siguiente animación, que ilustra muy claramente el proceso descrito.



estructuras moleculares importantes. Esto puede producir, entre otras cosas, cambios en el ADN de células que, si no son reparadas o destruidas a tiempo por el sistema inmunológico del cuerpo, pueden replicarse sin control y derivar en cáncer. El impacto de la radiación en seres vivos es acumulativo, por lo que no solo es importante que la dosis única que se recibe durante un evento solar sea baja, si no también que el nivel acumulado durante un día, semana o año no supere los estándares médicos recomendados.

- En la atmósfera:

- Auroras polares (Figura 6b y c), que son las bellísimas luces emitidas por los gases de la atmósfera terrestre cuando son impactados por partículas solares cargadas que lograron penetrar la magnetosfera durante una tormenta solar. Las partículas son inyectadas en los polos magnéticos terrestres debido al proceso de reconexión magnética explicado arriba y llueven en la atmósfera sobre zonas con forma de anillo de unos 3 mil km de diámetro, denominadas óvalos aurorales. Luego del impacto, los átomos del gas se desexcitan y emiten luz en diferentes colores, según de qué gas se trate (verde para el oxígeno y rosado para el nitrógeno).

- Interrupción de las comunicaciones radiales fruto de la modificación en las propiedades de la ionosfera. Esta es una capa de la atmósfera entre 50 y 950 km de altura, donde se encuentra una alta densidad de partículas cargadas (principalmente átomos ionizados y electrones). La radiación solar puede modificar la concentración de cargas en la ionosfera y afectar su capacidad de transmitir o reflejar las ondas de radio. Para comunicaciones terrenas de larga distancia, el transmisor utiliza la ionosfera como un espejo reflector que permite que un haz de radio alcance el receptor en un punto muy alejado a varios miles de kilómetros, oculto por la curvatura de la Tierra. Este tipo de comunicación se usa en enlaces de radio trasatlánticos, en los cuales se pueden producir interrupciones durante tormentas geomagnéticas. Varios sistemas militares, como los radares¹⁴, así como la comunicación con aviones en vuelos transpolares, también pueden verse afectados. Las comunicaciones entre bases Terrenas y satélites artificiales, usadas tanto para transmitir datos como para control del aparato espacial, también pueden interrumpirse por las variaciones de la ionosfera. Esto incluye la degradación en la calidad de los sistemas de posicionamiento global como GPS o GLONAS, que ven reducida la precisión en la posición y velocidad reportadas.

- Aumento del arrastre atmosférico de satélites. Debido al incremento en la densidad de los gases de la atmósfera y el aumento del rozamiento asociado, los satélites artificiales en órbitas bajas (menos de 600 km) pueden experimentar una mayor pérdida de altitud, lo que produce un aumento en el gasto del combustible necesario para compensar por este efecto y reducción de su vida útil.

- Aumento de la Radiación de partículas energéticas que reciben pasajeros y tripulación de aviones en vuelos transpolares (relevante a más de 10 km de altura). Esto obliga a la reprogramación de vuelos comerciales durante fenómenos solares peligrosos.

- En la superficie, la abrupta fluctuación del campo magnético terrestre durante una tormenta geomagnética puede producir:

- Afectación de sistemas magnéticos utilizados en diversas industrias. Por ejemplo, el guiado durante la perforación de pozos petroleros depende de mediciones del campo magnético terrestre. También se ha detectado la detonación indeseada de minas marítimas militares que son disparadas por medios magnéticos. Algunos sistemas de defensa contra misiles balísticos intercontinentales también pueden verse afectados.

- Inducción de corrientes geomagnéticas en cualquier conductor de longitud considerable (cientos de km). Este es tal vez el efecto de la ME socialmente más crítico, pues puede producir altas corrientes (cientos de Amperes) y dañar transformadores y otros equipos de la red de distribución eléctrica, u ocasionar la activación de sistemas de protección de sobre carga. Esto puede resultar en apagones prolongados masivos con consecuencias graves para muchas industrias, algo que ya ha ocurrido un puñado de veces. El peor evento se registró el 13 de marzo de 1989, cuando una tormenta geomagnética destruyó transformadores y otros componentes de la empresa Hydro Quebec, lo que derivó en un apagón en gran parte de Canadá y parte de los Estados Unidos, y produjo pérdidas por 6 mil millones de dólares. Las corrientes geomagnéticas son mayores a altas latitudes y pueden inducirse también en los largos conductos de gas o petróleo (aumentan la tasa de corrosión), y en las vías de ferrocarriles (afectan sistemas de control de tráfico y/o comunicaciones).

¹⁴ En 1967, una interrupción en el funcionamiento de los radares militares de EEUU durante una semana completa, en plena guerra fría, casi deriva en un holocausto nuclear con la Unión Soviética. La historia no tuvo este trágico final gracias a que un pequeño y recientemente establecido equipo militar que monitoreaba la actividad solar descubrió que la causa fue una fuerte tormenta geomagnética.

Como se expuso arriba, todos estos efectos de la ME tiene un gran impacto en diversas industrias cruciales para la sociedad moderna, por lo que estudiar su posible predicción y mitigación puede resultar en un gran beneficio práctico y económico. Se estima que, si ocurriese en la actualidad un evento tan violento como el que presenció Carrington en 1859, habría pérdidas solo en los Estados Unidos por 1 o 2 billones de dólares en el primer año, y que una recuperación total tomaría de 6 a 10 años¹⁵. La evidencia sugiere que en el año 2012 ocurrió una tormenta solar de tales magnitudes, que no tuvo efectos catastróficos simplemente porque la dirección a la que fue eyectada desde el Sol provocó que no impactara de lleno la Tierra.

4. Lejos de casa: Efectos de la ME fuera de la magnetosfera terrestre y en Marte

Las perturbaciones en el viento solar (producidas por ECM o ráfagas rápidas) y las partículas energéticas y radiación, tanto solar (producidas por fulguraciones o violentas ECM) como asociada a rayos cósmicos, no solo afectan el entorno cercano a la Tierra. Estos fenómenos de la ME se originan en el Sol y luego se propagan hacia el espacio interplanetario, y, en su camino, pueden interactuar con cualquier cuerpo celeste (cometa, planeta o luna), artefacto humano (satélite, misión de exploración o posible base marciana) o astronauta desprotegido que encuentren a su paso. El estudio de la ME fuera de la Tierra es más complicado y queda aún mucho por aprender. Esto es así porque cada cuerpo celeste tiene sus propias características físicas (tamaño, magnetismo, composición de la atmósfera, órbita, etc.) que hacen necesario plantear procesos específicos para explicar los fenómenos observados, y adquirir mediciones remotas usando telescopios o en el lugar. Esto último implica enviar costosísimas misiones espaciales científicas, que en general tardan de 5 a 15 años en construirse, varios meses o años más en llegar a su destino y, además, son propensas a fallar.

La propagación de fenómenos solares es bastante direccional, las ECM son eyectadas y se expanden generalmente en forma radial, a partir de una región pequeña sobre la superficie del Sol. En su propagación, las ECM interactúan con el viento solar de fondo, se aceleran si son más lentas o se desaceleran si son más rápidas que este viento. Por otro lado, las partículas solares energéticas tienden a seguir las líneas magnéticas de la espiral de Parker. Por eso, estos fenómenos solares no afectarán a todos los cuerpos del sistema solar con la misma intensidad. Por ejemplo, puede suceder que las posiciones de los planetas sean tales que una ECM o chorro de partículas energéticas afecte a la Tierra, pero no a Marte, o viceversa (ver el ejemplo más abajo). Además, los efectos de la ME sobre los distintos cuerpos cambian consi-

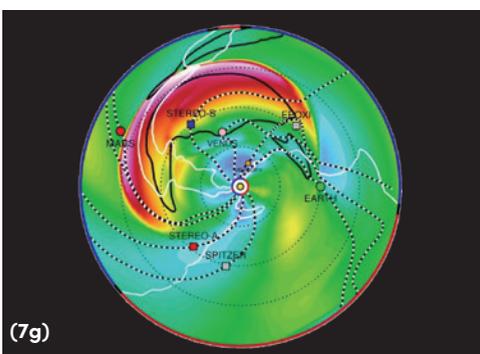
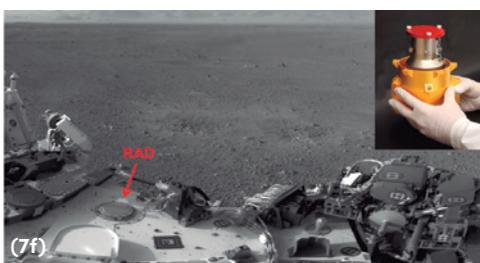
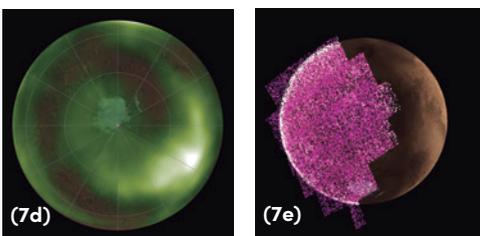
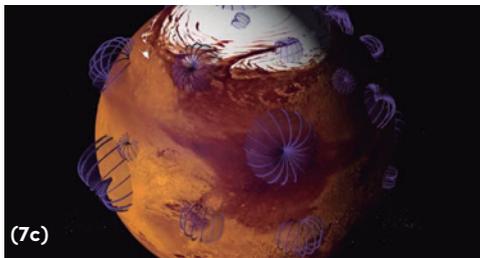
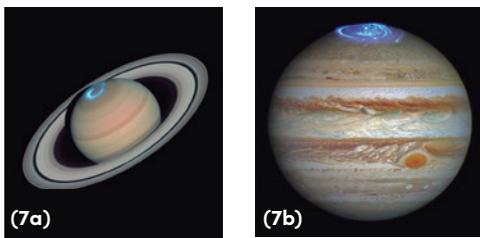
derablemente de acuerdo con las propiedades de sus magnetosfera y atmósferas, en caso de que posean una. Esto se ve, por ejemplo, en las auroras observadas en los planetas gaseosos de nuestro sistema, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno (Figura 7a y b), que aparecen también en forma de óvalo cerca de los polos, pues son ocasionadas esencialmente por el mismo mecanismo observado en la Tierra. Esto es, brillan porque partículas solares excitan los gases de la atmósfera del planeta. Estas partículas cargadas son inyectadas en latitudes polares gracias a la reconexión del campo magnético de una tormenta solar con la magnetosfera global dipolar de estos planetas. Lo mismo no sucede Marte, pues ya no posee un núcleo caliente como el de la Tierra, que sea capaz de generar internamente un campo magnético global mediante un proceso de dinamo. Se cree que el dinamo marciano cesó de funcionar hace aproximadamente 4 mil millones de años, lo que dejó al planeta sin una magnetosfera global protectora que deflece las peligrosas partículas cargadas provenientes del Sol y los rayos cósmicos.

Muchas de las misiones enviadas a Marte incluyeron entre sus instrumentos de investigación detectores de partículas, magnetómetros y cámaras fotográficas especiales que permitieron estudiar la ME marciana, tanto desde el espacio como en su superficie. Estas misiones incluyen orbitadores como el MARS GLOBAL SURVEYOR, MARS EXPRESS y MAVEN, y rovers como CURIOSITY, entre muchas otras¹⁶. Gracias a estas sofisticadas y exitosas obras de ingeniería, hoy conocemos algunos de los mecanismos básicos de interacción entre los diversos fenómenos solares y Marte. En 2001, la misión MARS GLOBAL SURVEYOR estableció¹⁷ que el campo magnético marciano no es global, sino que es solo un débil e irregular campo remanente, en forma de domos distribuidos por el planeta, que son producidos por concentraciones de minerales de la corteza que fueron magnetizados en el pasado (Figura 7c). En parte debido a la falta de una magnetosfera, es que el viento solar contribuyó a eliminar la atmósfera del planeta. La atmósfera actual de Marte es tenue (unas 100 veces menos densa que en la Tierra), lo que incrementa los niveles de radiación en la superficie. Dadas las propiedades de su atmósfera y el particular campo magnético del planeta, se han descubierto dos tipos básicos de auroras en Marte, ambas observadas en el ultravioleta (invisible al ojo humano). El primer tipo, descubierto en 2005 por MARS EXPRESS¹⁸ y únicamente observado en Marte, son parches de auroras intermitentes localizados a 140 km de altura, cerca de las concentraciones del campo magnético marciano (Figura 7d). Las partículas solares cargadas son aceleradas al interactuar con los domos del campo magnético remanente del planeta y excitan la atmósfera cercana. El segundo tipo, descubierto por MAVEN en 2014 y 2017, son auroras difusas, muy extendidas y que pueden durar varios días (Figura 7e). Este es un tipo

¹⁵ National Research Council, Severe Space Weather Events—a Workshop Report, The National Academies Press, Washington, EEUU, 2008 (en inglés).

¹⁶ Este libro cuenta con un capítulo dedicado a cada una de estas impresionantes y exitosas misiones de exploración marciana, por lo que remito al lector al capítulo correspondiente para conocer más detalles sobre cada una de ellas.

¹⁷ Acuña, M. H. y otros, Magnetic field of Mars: Summary of results from the aerobraking and mapping orbits. J. Geophys. Res. 106, 23403–23417, 2001 (en inglés).



ME en otros planetas:

Fotografías de las auroras polares en forma de anillo en Saturno (a, NASA) y Júpiter (b, NASA y ESA), similares a las observadas en la Tierra. Gráfico que ilustra el campo magnético marciano remanente, en forma de domos violetas dispersos por el planeta (c, NASA). Imagen ultravioleta de los parches de auroras intermitentes observados en el hemisferio sur de Marte, sobre las concentraciones del campo magnético remanente (d, NASA). Aurora ultravioleta global y difusa observada en el lado nocturno de Marte (e, NASA). El detector de radiación RAD montado en el Rover CURIOSITY, fotografiado sobre la superficie de Marte (f, NASA/JPL y SwRI). Simulación que muestra la posición del Sol (al centro), la Tierra (punto verde) y Marte (punto rojo) durante la tormenta solar (región roja en forma de plátano) del 10 de septiembre de 2017 (g, NASA/Wsa-Enlil, fuente en la nota al pie 20).

de aurora propia de la interacción entre partículas solares energéticas y la atmósfera de planetas que no poseen una magnetosfera global (como Marte o Venus) que guíe y concentre las partículas cerca de los polos magnéticos.

Como discutiremos en la Sección 5, uno de los efectos más importantes de la ME para la exploración de Marte es el nivel de radiación en su superficie. El rover CURIOSITY ha estado midiendo los niveles de radiación en la superficie marciana (Figura 7f) desde el año 2012¹⁹. CURIOSITY descubrió que, si bien los niveles de radiación están normalmente dominados por las partículas de rayos cósmicos provenientes de nuestra galaxia y las partículas secundarias generadas por estos rayos al colisionar con átomos de la atmósfera o suelo marcianos, en escalas de tiempo cortas (horas a días), la radiación puede estar dominada por una lluvia de partículas solares asociadas a ECM o fulguraciones. CURIOSITY midió el primer evento de partículas solares energéticas en la superficie de Marte en 2013 y, en 2017, el efecto de una de las tormentas solares mejor registradas en el planeta rojo hasta la fecha²⁰. El 10 de septiembre de 2017, una mancha solar produjo una brillante fulguración acompañada de un chorro de partículas energéticas y una ECM. Esta ECM fue rápida: en su trayecto alcanzó dos ECM que se habían producido el día anterior. Las tres ECM se fusionaron, algo que puede suceder en épocas de mucha actividad solar, y formaron una ECM aún mayor. El impacto en la ME de este violento fenómeno fue de amplio alcance y pudo observarse en la Tierra y en Marte con la utilización de los instrumentos montados en múltiples misiones, tanto en órbita como en la superficie de los dos planetas. Este evento es un muy buen caso de estudio para describir las distintas etapas de una tormenta solar y sus principales efectos en Marte, por lo que a continuación resaltamos los puntos más importantes:

- Radiación electromagnética: La fulguración solar del 10 de septiembre de 2017 produjo una enorme cantidad de rayos X que se detectaron unos 8 minutos más tarde en órbita terrestre, a las 15:35 hs, y en órbita marciana solo 5 minutos después. En Marte, esto afectó sobre todo la atmósfera a altas altitudes (más de 100 km). La misión MAVEN registró un incremento de temperatura de 70 grados y una expansión de la atmósfera neutra. Los niveles de ionización se incrementaron y modificaron las propiedades de la ionosfera marciana. Estos efectos pueden influenciar comunicaciones radiales y la tasa de escape a la cual Marte pierde parte de su atmósfera hacia el espacio, entre otros.
- Partículas solares energéticas: Inmediatamente después de la fulguración, una rápida y amplia ECM fue eyectada del Sol a las 15:54 hs. Al propagarse, esta ECM produjo una onda de choque que aceleró partículas solares a altas energías. Estas partículas comenzaron a llegar a Marte unas 3 horas más tarde, alrededor de las 19:20 hs, e incrementaron de manera drástica los niveles de radiación en el entorno, atmósfera alta y superficie del planeta. En la atmósfera, estas partículas produjeron auroras de tipo difuso y localizado, detectadas por MAVEN el 13 y 14 de septiembre, y una interrupción de las comunicaciones de radio debido a la modificación de la ionosfera. A diferencia de la Tierra, la falta de una magnetosfera global y una atmósfera gruesa en Marte hizo que muchas de estas partículas alcanzasen también la superficie del planeta. CURIOSITY, ubicado en ese momento en el cráter Gale, detectó incrementos en la radiación de superficie a partir de las 19:50 hs. Este fue el primer evento solar en el que se han podido registrar partículas solares energéticas de manera simultánea en la Tierra y sobre Marte.

¹⁸ Jean-Loup Bertaux y otros, Discovery of an aurora on Mars, NATURE 3603, 2005 (en inglés).

¹⁹ D. M. Hassler y otros, Space Weather on the Surface of Mars: Impact of the September 2017 Events. Space Weather, 16, 1702–1708, 2018 (en inglés).

²⁰ Lee, C. O y otros, Observations and impacts of the 10 September 2017 solar events at Mars: An overview and synthesis of the initial results. Geophysical Research Letters, 45, 8871–8885. 2018 (en inglés).

- ECM: En la Figura 7g, puede verse una simulación que muestra la posición del Sol y los planetas interiores durante la propagación de la ECM que se produjo a las 15:54 del 10 de septiembre y llegó a Marte unas 60 horas más tarde, a las 2:52 hs del 13 de septiembre. Los colores de fondo indican la velocidad del viento solar, por lo que puede verse la espiral de Parker en verde y celeste, y la ECM que aparece como una región en rojo (de altas velocidades) que tiene forma curva y alargada. Puede verse cómo la ECM impacta de refilón a la Tierra (punto verde) y un poco más de lleno a Marte (punto rojo). La llegada de la ECM produjo una leve reducción de la radiación en la superficie, pues puede actuar como un obstáculo magnético para las partículas cargadas provenientes de rayos cósmicos (efecto también observado en la Tierra). Por otro lado, el impacto de la ECM y la falta de una magnetosfera marciana presionó el campo magnético interplanetario y lo acercó considerablemente a la superficie. El resultado fue que hubo importantes variaciones magnéticas a unos 200 km de altura. Finalmente, el arribo de la ECM incrementó en mucho la tasa de escape a la que Marte pierde su atmósfera hacia el espacio exterior.

Como se aprecia en este caso de estudio, la actividad solar tiene múltiples efectos en Marte, algunos de los cuales son producidos por mecanismos distintos de los observados en la Tierra. Si bien la tormenta del 10 de septiembre de 2017 fue relevante y bien registrada, aún no se han observado con detalle los efectos de un evento solar realmente intenso en el entorno marciano. Como veremos en la Sección 5, estos efectos pueden ser perjudiciales para naves, sistemas de comunicaciones y astronautas, entre otros, tanto en camino a Marte como en su órbita y superficie.

5. Preparen las valijas: *ME y la exploración tripulada de Marte*

En el caso del clima y la meteorología de la Tierra, para poder investigar y posiblemente predecir la ocurrencia e intensidad de un fenómeno (por ejemplo un huracán), es necesario contar tanto con las teorías científicas que expliquen los mecanismos subyacentes (teoría de formación de huracanes), como con una flotilla de instrumentos de medición que permitan conocer en todo momento y en múltiples ubicaciones el estado de las variables físicas relevantes (velocidad del viento, presión atmosférica, humedad, etc.). En el caso de la ME ocurre lo mismo: para desarrollar una disciplina que sea de utilidad práctica para la actividad espacial y la sociedad en general, es necesario desarrollar modelos científicos con capacidad predictiva y contar con instrumentos de monitoreo de las condiciones del Sol, de las magnetosferas planetarias y del espacio interplanetario. La predicción

del lugar en que puede ocurrir un huracán en los océanos de la Tierra, así como de su intensidad, resultan información imprescindible para cualquier barco que quiera tener un viaje seguro y exitoso. De la misma forma, la ME adquiere una importancia crucial al plantear cualquier tipo de exploración tripulada del sistema solar, incluidos los viajes y el establecimiento de bases en la Luna, Marte y más allá.

Los principales efectos de la ME relevantes para una misión a Marte son²¹:

- Descargas electrostáticas de superficie: La acumulación de cargas (electrones), fruto del arribo de un evento solar, puede producir una carga electrostática del suelo marciano. Este efecto fue observado por la misión LUNAR PROSPECTOR en la superficie de la Luna durante una tormenta solar. Esto puede derivar en descargas eléctricas en las naves o bases en la superficie marciana que dañen equipamiento crítico. Si bien no ha sido un problema para misiones robóticas, es un fenómeno que requiere aún de más estudio.
- Efectos atmosféricos y magnéticos: Las modificaciones en las propiedades de la ionosfera marciana durante un evento solar pueden producir apagones de radio, dificultar o imposibilitar las comunicaciones entre superficie y órbita de Marte o entre superficie y Tierra. Además, la alta penetración del campo magnético interplanetario puede afectar cualquier sistema que dependa de mediciones magnéticas.
- Radiación en seres vivos: Tanto en viaje como en órbita y superficie de Marte, los astronautas están expuestos a la radiación. Este es el principal riesgo directo para la salud de la tripulación de una misión al planeta rojo. Las partículas energéticas de rayos cósmicos o solares, así como los rayos X o gamma producto de una tormenta solar, pueden elevar la dosis de radiación a niveles insalubres tanto para humanos como para vegetales y otros animales. La misión CURIOSITY midió los niveles de radiación durante su viaje de 180 días a Marte, en el que detectó una dosis promedio que es unas 3,5 veces mayor que la adquirida por astronautas de la estación espacial internacional durante 6 meses, y 16 veces mayor que la permitida para trabajadores del sector nuclear durante un año completo. Sobre la superficie marciana, CURIOSITY midió para un período de 500 días la misma dosis promedio que durante el viaje.
- Radiación en equipos: Como vimos, las partículas también pueden afectar todo tipo de equipos electrónicos, parte fundamental de naves espaciales, bases en superficie, rovers tripulados y todo sistema de supervivencia en general. Hay dos tipos de daños básicos: a) los eventos únicos, como la ejecución de

²¹ Mike Hapgood, The Impact of Space Weather on Human Missions to Mars: The Need for Good Engineering and Good Forecasts. In: Szocik K. (eds) The Human Factor in a Mission to Mars. Space and Society. Springer, Cham, 2019 (en inglés).

un comando no deseado, que producen fallas temporales o la destrucción inmediata del equipo y b) la degradación de largo plazo, que deteriora gradualmente el equipo pues reduce su rendimiento. Este último es muy relevante para el rendimiento de largo plazo de los paneles solares utilizados comúnmente para producir energía eléctrica y alimentar muchos sistemas críticos.

Estos efectos hacen que la ME influencie cualquier intento de misión tripulada a Marte en varios niveles o aspectos:

- **Diseño de naves y bases:** Las naves, bases y todo el equipamiento involucrado debe ser capaz de lidiar con la radiación permanente de los rayos cósmicos y con los picos de radiación durante eventos solares. Esto incluye evitar tanto errores o malfuncionamiento por eventos únicos, como la degradación de largo plazo producida por la exposición continua a la radiación. Además, el escudo protector que representan el casco y la estructura de las naves y bases, tanto durante el viaje como en su estadía en Marte, deben limitar a dosis total de radiación en sus tripulantes. Debido a que los picos de radiación durante eventos solares pueden ser muy elevados, los ingenieros pueden adoptar dos metodologías básicas de protección: a) fabricar todos los sectores habitables de las naves o bases involucradas con escudos lo suficiente fuertes para resistir los picos máximos esperados, o b) fabricar únicamente una sección específica de la nave o base, que esté especialmente reforzada para resistir la radiación extrema y en la que los astronautas puedan refugiarse durante un evento solar. La primera metodología implica un mayor costo en materiales, peso y tamaño de la nave o base, pero simplifica la operación de la misión. Para construir blindajes se pueden utilizar materiales densos como el metal que deberían traerse de la Tierra. Debido a una cuestión de experiencia y herencia tecnológica, es muy probable que durante las primeras misiones pequeñas a Marte se utilicen materiales densos. Sin embargo, estos no resultan muy prácticos para construir naves o bases de gran tamaño, debido al enorme gasto de combustible que implica poner masas de material en el espacio. Una mejor opción es construir cascos mucho más gruesos fabricados de materiales poco densos, como polvo lunar procesado, polietileno, agua, hidrógeno, etc. Los materiales poco densos tienen la ventaja adicional de que producen una menor cantidad de partículas secundarias nocivas (neutrones y rayos gamma) cuando son impactados por una partícula energética externa. Además, la construcción de naves de este tipo podría realizarse en órbita o sobre la Luna, y la de las bases en la superficie marciana utilizando materiales del lugar. Además del casco, es útil diseñar las naves y bases de modo que las secciones habitables estén en la parte más interna de la estructura, rodeadas por otros equipos o partes (como el tanque de abastecimiento

de agua o combustible) que actúen como escudos adicionales. Una tercera opción para fabricar un escudo anti-radiación es generar un campo magnético que rodee la nave o base, a modo de magnetosfera que deflece las partículas cargadas.

- **Selección del sitio de amartizaje:** Un aspecto que requiere estudios adicionales al pensar en estadías largas en Marte es la utilización de escudos naturales para proteger la misión de la radiación. Dos opciones para establecer bases son: a) en cuevas y cráteres marcianos que provean de una capa extra de protección, y b) debajo de los domos del campo magnético remanente del planeta, que es capaz de desviar partículas cargadas (pero no neutras).
- **Selección del momento de la misión:** Una opción importante y natural para lidiar con la radiación es utilizar el campo magnético interplanetario. Como se mencionó antes, el flujo de rayos cósmicos disminuye de modo considerable durante el máximo del ciclo de actividad del Sol. Durante unos cinco años alrededor del máximo, el campo interplanetario se desordena y bloquea con mayor eficacia la llegada de rayos cósmicos externos y reduce considerablemente la dosis total de radiación que sufrirían los astronautas en una misión a Marte. Esta opción tiene las desventajas de que solo se puede explotar durante una fracción de cada ciclo solar de 11 años y que, durante el máximo de actividad solar, se produce un mayor número de tormentas solares.
- **Operación de la misión:** La operación de cualquier misión tripulada a Marte va a verse muy afectada por las condiciones de la ME, en especial si se adopta la metodología de usar un único habitáculo para protección contra la radiación durante eventos solares. Esto implica tener todo el tiempo lista una sección de la nave o base, equipada con todos los sistemas de supervivencia y comunicación adecuados. Incluyendo sensores robustos de monitoreo de la radiación, para poder saber cuándo entrar y cuándo es seguro salir del refugio, y también comandos que permitan reiniciar sistemas críticos que puedan haber fallado durante la tormenta. La misión deberá contar con un equipo de soporte en la Tierra encargado de monitorear las condiciones en el Sol y que pueda advertir a la misión de un evento de ME que presente un riesgo potencial. De esta forma los astronautas pueden planificar sus actividades, por ejemplo, evitando tareas extra vehiculares, y preparar el refugio para ser usado en el momento en que los sensores de radiación locales detecten el arribo de un evento solar. Dado que la radiación actúa por acumulación en el cuerpo y no de forma inmediata (salvo en casos de dosis extremadamente altas), la metodología de operación descripta arriba permite minimizar el tiempo que la tripulación

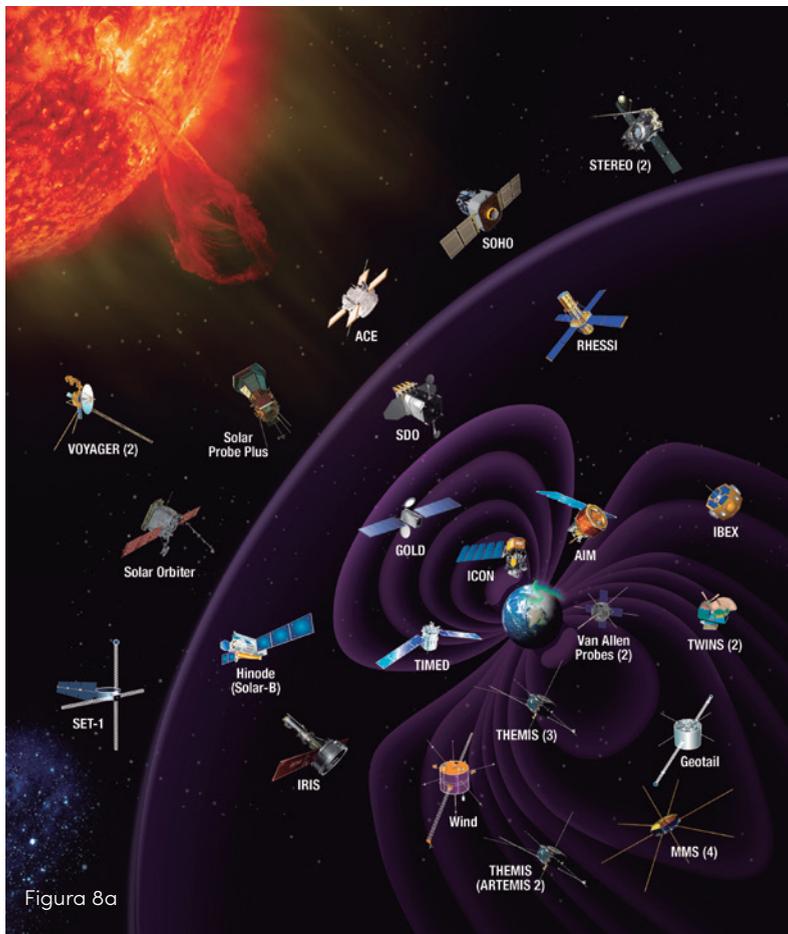


Figura 8a



Figura 8b



Figura 8c

Monitoreo de la ME:

Infografía que muestra la flota de misiones de distintas agencias espaciales (NASA, ESA y JAXA), dedicadas a estudiar la heliosfera y la relación Sol-Tierra (a, NASA). Fotografía del edificio de DKIST, el telescopio solar óptico más grande del mundo ubicado en Hawái (b, National Solar Observatory, EEUU). Instalaciones del programa de monitoreo continuo de la ME en Brasil (c, INPE/EMBRACE).

debe pasar en el refugio (de unos días a lo sumo). Una alerta temprana por parte del equipo en Tierra permitiría también configurar cualquier sistema sensible en modo seguro, similar a lo que hacen los operadores de satélites en la Tierra para mitigar los efectos de la radiación.

De lo expuesto durante este capítulo, puede verse con claridad que la ME tiene una gran relevancia no solo científica, si no también práctica. Pues afecta muchos sistemas y tecnologías críticas para el correcto funcionamiento de nuestra sociedad moderna, tanto en la superficie como en las orbitas útiles de la Tierra. Vimos también como la ME es de fundamental importancia para la exploración del sistema solar y, en particular, para los incipientes intentos de misiones tripuladas y establecimiento de bases permanentes en la Luna o en Marte. Debido a todo esto, resulta crucial continuar con el desarrollo de la ME para lograr obtener una disciplina e infraestructura capaces de proveer pronósticos útiles para las actividades humanas sensibles. Para lograr sendos desarrollos hace falta avanzar en dos aspectos fundamentales:

- Incrementar el conocimiento sobre los mecanismos físicos y efectos de la ME. Los científicos dedicados al estudio de la física solar han logrado en los últimos 70 años increíbles avances en nuestro entendimiento del astro rey. Sin embargo, la complejidad del funcionamiento del Sol, así como la dificultad intrínseca para tomar mediciones, hacen que aún no sea posible predecir la intensidad de un ciclo solar o el momento en que va a ocurrir una fulguración o ECM. Nuestra capacidad predictiva actual se reduce sobre todo a poder estimar la llegada de una ECM o chorro de partículas energéticas a la Tierra u otro planeta, una vez que ya se haya producido el evento en el Sol. Esto es posible solo en los casos en que la ECM pueda ser observada por alguna de las misiones de monitoreo del Sol actuales para poder estimar su velocidad y dirección de propagación. Esta predicción del tiempo de arribo de ECM es relativamente buena para el caso de la Tierra, donde varios instrumentos están monitoreando la línea que une el Sol con nuestro planeta (Figura 8). Estos instrumentos pueden fotografiar y detectar emisiones de radio y otras cantidades que permiten estimar el arribo de una ECM con algunas horas de precisión. Dado el tiempo de propagación típico de una ECM, este pronóstico puede darse solo unas horas o, en el mejor de los casos, uno o dos días, antes del arribo de la ECM a la Tierra. Para muchos sistemas tecnológicos, esta alerta puede no ser lo suficientemente anticipada e impedir a los operadores tomar los recaudos necesarios. Para el caso de Marte, la predicción del tiempo de arribo de una tormenta solar está mucho menos desarrollada. Esto se debe a que hay muy pocas misiones de observación del Sol y de las condiciones de la ME cerca del planeta rojo. Solo desde 2004 con las misiones MARS EXPRESS y MAVEN, es posible monitorear de manera cuasi-continua el estado del viento solar en órbitas cercanas a Marte y así poder registrar la llegada de una ECM para mejorar los métodos de estimación del

tiempo de arribo. Es necesario también comprender mejor la propagación de partículas solares energéticas, las propiedades del viento solar y del campo magnético interplanetario y la relación entre la actividad solar y los niveles de radiación por rayos cósmicos, más allá de la Tierra, en la Luna, el medio interplanetario y Marte.

- Incrementar la flota de misiones y los programas de monitoreo de la actividad solar y de la ME. En la actualidad, hay muchos instrumentos dedicados a estudiar el Sol y los efectos de la ME, aunque enfocados en la relación Sol-Tierra (Figura 8a). En la superficie de la Tierra contamos con decenas de telescopios de observación solar modernos, tanto ópticos (Figura 8b) como de radio. Además, hay activas más de 25 misiones espaciales dedicadas a estudiar el Sol, la heliosfera²² y la relación Sol-Tierra. Sin embargo, la mayor parte de los instrumentos de monitoreo del Sol y la ME yacen en órbita terrestre o sobre la línea Sol-Tierra. Esto plantea un problema importante para misiones a Marte. A saber: pueden ocurrir eventos solares en momentos en que la Tierra y Marte están posicionados de manera tal que el evento sea invisible desde la perspectiva de la Tierra y que solo afecte a Marte. Esto impediría utilizar telescopios terrenos o la flota de naves más nutrida que se encuentra cerca de la Tierra para detectar el evento y dar alerta a una misión en camino o ya en Marte. Debido a que las posiciones relativas de Marte y la Tierra cambian continuamente durante el año, y que se busca también poder detectar eventos peligrosos para las naves durante su viaje a Marte, una solución de monitoreo óptima es la de construir un conjunto de satélites que rodeen el Sol para cubrir todos los ángulos posibles. Esta flotilla, de tal vez 10 satélites, permitiría un monitoreo continuo y de 360 grados del Sol, ayudaría a detectar de forma remota ECM invisibles desde la perspectiva de la Tierra y las condiciones del viento y de radiación solar en el lugar. Para poder utilizar de manera efectiva los datos provistos por todos estos instrumentos, existentes o propuestos, es necesario contar con programas de monitoreo de la ME. En la actualidad varios países, incluidos los Estados Unidos, la Unión Europea, Japón y Brasil (Figura 8c), cuentan con oficinas gubernamentales dedicadas a esta tarea. Estos programas están monitoreando permanentemente la actividad del Sol y las condiciones del medio interplanetario, los cinturones de radiación y la magnetosfera para alertar, en caso de eventos potencialmente peligrosos, a todos los sectores sociales interesados, incluidos el sector espacial, la aviación comercial, los organismos de defensa, las empresas de distribución eléctrica, entre otros. En la Argentina el monitoreo de la ME se encuentra concentrado en el Laboratorio Argentino de Meteorología del espacio (LAMP²³), con sede en la Universidad de Buenos Aires y vínculos con el Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE, UBA- CONICET) y el Instituto Antártico Argentino. Un programa espacial con múltiples misiones o de establecimiento permanente en la Luna o Marte requiere de un programa de monitoreo de ME extendido que incluya las condiciones en estas ubicaciones y en los trayectos hacia ellas. Este programa probablemente requiera de un esfuerzo internacional coordinado.

Para saber más: Enlaces a sitios de interés

Además de las fuentes citadas en el texto y de la noble Wikipedia, los lectores interesados pueden encontrar más información en español en los siguientes enlaces:



Video de 10 minutos explicando la ME



Página sobre ME de la NASA



Página para chicos sobre ME de la ESA



Página sobre ME de NOAA de EEUU



Interesante sitio sobre ME con contenido multimedia



Libro Los Enigmas del Sol, del director de LAMP, Sergio Dasso



Serie animada que explica los principales fenómenos solares de forma muy amena



¡Explore la actividad solar y las condiciones de la ME en tiempo real!



Pequeño video explicativo sobre ME de la NASA

²² Se denomina heliosfera a la región del espacio donde las condiciones son dominadas por la acción del Sol. Se extiende más allá de Plutón y termina en donde el viento solar se encuentra con el viento interestelar.

²³ Se puede encontrar más información sobre LAMP y su interesante actividad que incluye la instalación y operación de un detector de rayos cósmicos en la Antártida Argentina, en el sitio oficial del laboratorio: <http://spaceweather.at.fcen.uba.ar/2/lamp/>

Geografía de Marte

Por Diego Bagú¹

Marte, nuestro continuo desvelo

Desde el preciso momento en que alguna primera vez elevamos nuestra mirada al cielo y nos preguntamos por lo que contemplamos, una de esas luces, bien rojiza por cierto, nos cautivó para siempre. Marte ha sido, a lo largo de la historia humana, dueño y responsable en gran parte de nuestra admiración, aspiraciones, sueños y deseos. El hecho de que nos interroguemos por quien fuera más tarde el dios romano de la guerra generó las más amplias y surrealistas ideas no solo respecto de su naturaleza sino, además, de sus potenciales habitantes.

Sin duda alguna, su cercanía, en comparación con otros cuerpos del sistema Solar, ha hecho de este vecino un protagonista indiscutido de nuestros esfuerzos incesantes por comprenderlo y conquistarlo. De hecho, la observación sistemática, precisa y rigurosa del extraordinario Tycho Brahe en pleno siglo XVII, permitió, años más tarde, que el último astrólogo-astrónomo de la historia, Johannes Kepler, descubriera las tres grandes leyes del movimiento planetario.

En ese rico devenir por querer robar a Marte sus tan preciados secretos, fuimos intentando con el correr de los siglos descifrar sus detalles superficiales. Desde ya, más aquí en el tiempo y con la exploración espacial como protagonista del siglo XX, hemos logrado describirlo casi al detalle. Pero, para alcanzar tal cometido, fue necesario el trabajo incesante de unos cuantos precursores.

La importancia de la cartografía

La geología planetaria puede catalogarse como una de las disciplinas más fascinantes de las ciencias espaciales pues nos permite construir el derrotero geológico de los mundos en estudio. Y, en ese colosal esfuerzo por armar de la mejor manera posible sus historias, nos brinda una herramienta inmejorable no solo para comprender la Tierra sino

nuestro origen como especie. Dos disciplinas son claves en esta temática y ambas van de la mano: la geografía y a la cartografía. Las dos son necesarias para reconstruir la historia geológica de Marte. Esta titánica tarea es fundamental en el intento de colonizarlo y convertirlo, junto con la Luna, en nuestro próximo hogar extraterrestre en el vasto barrio cósmico del sistema Solar.

Los primeros mapas

Bien sabemos que Galileo Galilei, en 1609, fue el primero en utilizar un telescopio para observar los cuerpos celestes y Marte fue uno de sus objetivos. De todas maneras, fue el holandés Christiaan Huyghens quien nos dio los primeros “detalles” de nuestro vecino cuando logró discernir una mancha algo oscura sobre el pequeño disco planetario. Corría el año 1659 y, es casi seguro, Huyghens estaba capturando la región de Syrtis Major, una meseta de basalto volcánico con una significativa ausencia de polvo, lo que le brinda ese aspecto oscuro tan característico. De hecho, la observación de manera sistemática de dicha estructura geológica le permitió ser el primero en lograr determinar de manera muy aproximada al valor real el período de rotación marciano². Años más tarde, en 1666, otro gran astrónomo de la antigüedad, Giovanni Cassini³, logró pulir el valor de esa rotación a 24 horas con 40 minutos.



Composición de unas 100 imágenes obtenidas por el orbitador Viking 1 a una escala de 1km/pixel. La zona oscura que se observa en primer plano es Syrtis Major. Hacia el sur de la imagen, bajo una escarcha de dióxido de carbono, se aprecia la gran cuenca de impacto Hellas. (NASA/JPL)

¹ Licenciado en Astronomía (Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas-FCAG, Universidad Nacional de La Plata-UNLP). Especialista en geodesia satelital. Investigador/docente de la FCAG y director del Planetario de la UNLP.

² Vale mencionar que Huyghens fue también el primero en observar la capa blanquecina del polo sur de Marte.

³ Giovanni Domenico Cassini nació en Italia y posteriormente se convirtió en ciudadano francés. Usualmente se lo conoce con la versión francesa de su nombre: Jean-Dominique Cassini.