

METEOROLOGÍA EXTRATERRESTRE. EL TIEMPO EN OTROS PLANETAS DEL SISTEMA SOLAR

DOCTOR D. RAFAEL BACHILLER GARCÍA
Académico de la Real Academia de Doctores de España.
Astrónomo y director del Observatorio Astronómico Nacional (IGN)

INTRODUCCIÓN

Hace unos cinco mil de millones de años que una nube interestelar compuesta de gas y polvo, situada cerca del brazo de Orión en la Vía Láctea, comenzó a desplomarse por el efecto de su propio peso iniciándose así la formación del sistema solar. La zona central de la nube llegaría a ser muy densa debido al efecto de la gravedad y la alta compresión del gas elevaría las temperaturas de tal manera que pudieron iniciarse las reacciones termonucleares. Había nacido nuestro Sol y, rodeándolo, quedaba un disco de gas polvoriento en rotación. Las inhomogeneidades en este disco fueron formando cuerpos en los que la materia que no había alcanzado las altas temperaturas que son necesarias para formar estrellas. Estos cuerpos darían lugar a los planetas y a toda una serie de productos menores (planetas enanos, satélites, asteroides y cometas).

La vida de los humanos es muy corta comparada con el periodo de formación y evolución de los planetas. Aunque a largo de nuestras vidas los planetas nos parezcan invariables, la verdad es que cada uno de los ocho planetas está sometido a unos procesos de evolución muy específicos debidos a las peculiaridades tanto físicas como químicas de cada uno de los cuerpos. Además, los planetas han pasado por épocas de grandes catástrofes (por ejemplo los intensos bombardeos de meteoritos) y, aún ahora, asistimos a espectaculares sucesos que tienen lugar en ellos. Por ejemplo, entre los días 16 y 22 de Julio de 1994, un cometa, el Shoemaker Levy 9, cayó sobre la superficie de Júpiter tras desintegrarse en una serie de fragmentos de hasta 2 kilómetros de tamaño.

Los fenómenos meteorológicos se encuentran entre los acontecimientos más espectaculares que podemos observar en los planetas del sistema solar. En efecto, los actuales medios observacionales nos permiten hoy estudiar las características de las atmósferas de todos los planetas del sistema solar, e incluso las de algunos planetas enanos y satélites. Por supuesto resulta factible observar la dinámica de las atmósferas y los elementos más importantes de la climatología en todos estos cuerpos hermanos de nuestra Tierra, y es posible hacerlo con un sorprendente nivel de detalle.

Las diferencias físicas y químicas entre los diferentes planetas ocasionan grandes diferencias en sus comportamientos climatológicos. Al fin y al cabo la climatología no es más que una manifestación de las variaciones energéticas que, a nivel más o menos local, tienen

lugar en la atmósfera de un planeta. Las variaciones de presión y temperatura, acoplados con la rotación diurna, generan movimientos de materia en la atmósfera y tales movimientos pueden interactuar con la superficie del planeta (en los planetas rocosos), ejerciendo importantes efectos tanto sobre las regiones cubiertas por material sólido como sobre los posibles mares, o con las regiones más internas en el caso de los gigantes gaseosos.



Comparación de Mercurio, Venus, la Tierra y Marte | NASA, Mariner 10, USGS

Naturalmente los habitantes de la Tierra estamos interesados, sobre todo, por la meteorología de nuestro planeta y, muy particularmente, por la predicción del tiempo con la mayor precisión posible tanto a corto como a medio y largo plazo. Pero no hay ninguna duda de que también resulta interesante y beneficioso el estudio de la climatología de otros planetas. Estudiando el comportamiento de otras atmósferas, que cubren un amplio abanico de condiciones físicas y de composiciones químicas, podemos comprender mejor cómo las diferentes condiciones iniciales producen efectos muy diferentes en el clima. Este método de estudio forma parte de lo que se ha venido en denominar «planetología comparada».

Aunque la observación de planetas extrasolares (en torno a otras estrellas) está experimentando una auténtica revolución en nuestros días, los datos no son suficientemente detallados aún como para estudiar la meteorología de ninguno de esos cuerpos. Por otro lado, los fenómenos denominados «tormentas solares» en los que se eyectan grandes masas de la corona solar, presentan grandes diferencias desde un punto de vista físico, con los fenómenos atmosféricos a los que se refiere tradicionalmente la meteorología. Por todo ello, aunque este artículo porte el ambicioso título de «Meteorología extraterrestre», necesariamente ha de limitarse a la climatología en los otros cuerpos de nuestro sistema solar.

1. VERANO INFERNAL EN MERCURIO

Mercurio posee una atmósfera muy tenue y, por tanto, una meteorología muy limitada. Su atmósfera parece estar formada por partículas eyectadas desde la superficie del planeta por el efecto de la radiación y del viento solar. Los componentes principales son el helio, el sodio y el oxígeno atómico, seguidos por el hidrógeno y el potasio. Las concentraciones de algunos de estos elementos observados (sodio, calcio y magnesio, entre otros) en la atmósfera y sus variaciones con la iluminación solar no se comprenden bien aún hoy día.



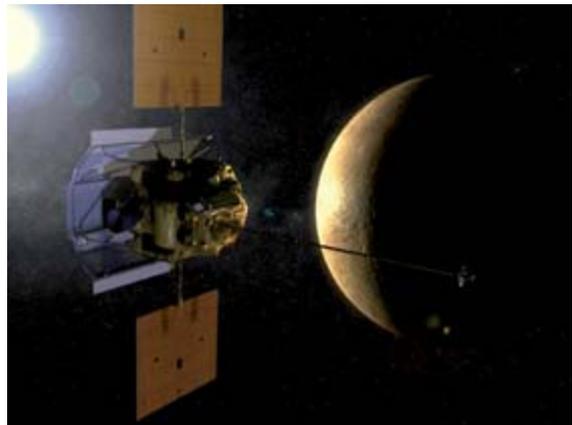
*Mercurio observado por la sonda Messenger /
NASA/JHUAPL/CIW*

Mercurio gira muy lentamente sobre sí mismo: el día de Mercurio equivale a 59 días terrestres y el año Mercurial (el periodo de traslación en torno al Sol) dura 88 días terrestres. En consecuencia, el día en Mercurio (el tiempo desde un amanecer al siguiente) parece durar unos 176 días terrestres, o lo que es lo mismo: ¡dos años Mercuriales! En resumidas cuentas, una parte de la superficie del planeta está expuesta a la radiación solar ininterrumpidamente durante 88 días terrestres, y ello puede elevar la temperatura hasta unos 400 grados Celsius, un «verano» verdaderamente infernal. Sin embargo, la cara del planeta que se encuentra opuesta al Sol permanece a temperaturas mucho más bajas. Recuerdese, no obstante, que como el eje de Mercurio no está inclinado, en este

pequeño planeta no hay estaciones similares a las de la Tierra.

Se ha especulado mucho sobre la posible presencia de agua en Mercurio. De hecho, observaciones de radar realizadas desde la Tierra han revelado áreas de alta reflectividad cerca de los polos de Mercurio, lo que parece indicar que puede existir hielo en cantidades muy significativas, al menos en esas regiones polares. Cabe señalar que la existencia de algo de agua en este planeta no resultaría muy sorprendente, pues podría haber sido depositada durante el intenso bombardeo de cometas y meteoritos a que estuvo sometido el planeta en el pasado. Desde los polos del pequeño planeta, el Sol sólo se ve a muy baja elevación sobre el horizonte y los cráteres de las regiones polares crean grandes regiones de sombra. Las únicas zonas en las que podría sobrevivir algo de hielo son, pues, aquellas áreas a la sombra permanente de las paredes de los cráteres cerca de los polos.

La sonda Messenger (MErcury Surface, Space ENvironment, GEochemistry and Ranging) de la NASA fue lanzada desde Cabo Cañaveral el 3 de agosto de 2004 con destino a Mercurio. Tras realizar tres aproximaciones al planeta entre 2008 y 2009, la nave fue insertada en la órbita planetaria en marzo 2011 donde permanece en el momento de escribir estas líneas. Esta ha sido la primera vez que una sonda espacial se emplaza en la órbita del pequeño planeta, pues la misión anterior a Mercu-



*Recreación de la sonda Messenger /
NASA/JHUAPL/CIW*

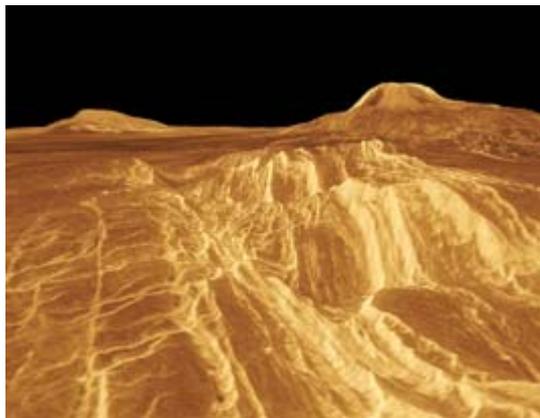
rio (la Mariner 10) tan solo realizó una serie de tres aproximaciones en los años 1974 y 1975.

La sonda Messenger va equipada con 7 equipos de medida, todos ellos blindados para soportar las difícilísimas condiciones de radiación y temperatura de las proximidades del Sol. Sus tres primeras aproximaciones a Mercurio permitieron cartografiar en detalle una gran parte de la superficie del planeta y una de las mayores sorpresas ha sido la constatación de que el planeta es, y ha sido, mucho más activo de lo que se pensaba. La superficie es mucho más heterogénea que la de la Luna, con grandes áreas cubiertas de lava lo que implica la presencia de intensa actividad volcánica en épocas pasadas. El origen e implicaciones de tal actividad constituyen aún auténticos misterios.

Las observaciones de la Messenger, actualmente en curso, deberían permitir conocer el planeta a escala global con un detalle sin precedentes, en particular su atmósfera. Por otra parte, las agencias espaciales europea y japonesa (ESA y JAXA) se encuentran desarrollando la misión BepiColombo para su lanzamiento hacia Mercurio en el año 2014. BepiColombo estará compuesta de dos sondas, una nave orbitando a una altura menor que la del Messenger permitirá recoger imágenes de mucho más detalle y espectros en diferentes rangos de frecuencias, mientras que una segunda nave se especializará en el estudio del campo magnético. Y la combinación de datos tomados por las diferentes naves permitirá realizar medidas de muy alta precisión.

2. EFECTO INVERNADERO EN VENUS

La atmósfera de Venus es unas 100 veces más densa que la de la Tierra, el 96 % de las partículas que la constituyen son moléculas de dióxido de carbono (CO_2) que causan un efecto invernadero extremo. En efecto, la luz solar alcanza sin problemas la superficie del planeta, muy particularmente la radiación ultravioleta pues, contrariamente a lo que sucede en la Tierra, en Venus no hay ozono que pueda absorberla. Tal radiación es absorbida por la superficie del planeta y vuelta a radiar pero, ahora, principalmente en el rango infrarrojo del espectro. El CO_2 atmosférico atrapa esta radiación y la re-emite hacia la superficie contribuyendo así a un calentamiento excesivo.

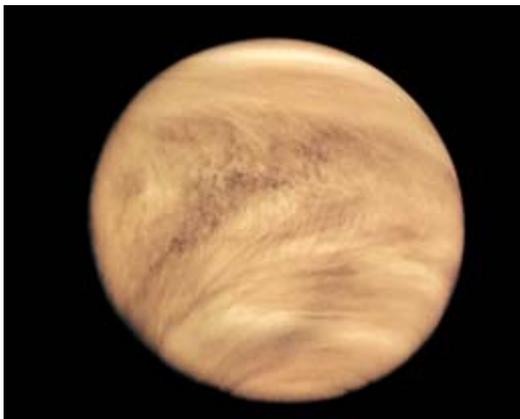


Recreación de un paisaje en Venus a partir de datos radar de la sonda Magellan | NASA/JPL

Debido a este intenso efecto invernadero, la temperatura de la superficie de Venus es varios cientos de grados más alta que si tuviese una atmósfera transparente. En efecto, si la atmósfera de Venus fuese transparente al infrarrojo, la temperatura de su superficie sería de unos -60 grados Celsius, mientras que lo que se observa es una temperatura de unos 440 grados Celsius. Las capas altas de la atmósfera permanecen durante la noche a unos 150 grados Celsius bajo cero, pero durante el día se calientan a unos 30 grados Celsius.

Las diferencias de presión en Venus crean vientos que, aunque sean relativamente lentos, pueden arrastrar grandes cantidades de arena de la superficie pues la densidad de la atmósfera es muy alta. Los vientos superficiales apenas superan los 4 km/h de velocidad.

La rotación de Venus es muy lenta (un día de Venus dura 243 días terrestres), por lo que la circulación de Hadley en su atmósfera (la que causan las diferencias de temperatura debidas a la latitud) crea vientos que se mueven esencialmente en dirección Norte-Sur. Sin embargo, las naves espaciales que han visitado Venus han demostrado que en la baja atmósfera los vientos soplan preferentemente en dirección Este-Oeste. El fenómeno que causa esta reorientación de los vientos no está del todo claro. El efecto de la fuerza de Coriolis es muy pequeño en Venus, pero la fuerza centrífuga debida a los propios vientos puede jugar un papel importante. La modesta velocidad de los vientos superficiales va creciendo con la altitud en la atmósfera alcanzando velocidades cien veces más rápidas cerca de las más altas nubes. Se da así una situación de «superrotación» de la atmósfera de Venus: los vientos se mueven a velocidades mucho más altas que la velocidad de rotación del planeta. Si



Las nubes de Venus fotografiadas por una de las sondas Pioneer / NASA

el planeta tarda 243 días terrestres en dar una vuelta completa, los vientos completan una vuelta en tan sólo cuatro días. Al ejecutar una de estas vueltas, debido a la circulación de Hadley, los vientos que comienzan en el ecuador van progresando también hacia los polos, se crea así una peculiar estructura de bandas de nubes, inclinadas con respecto al ecuador del planeta, que fue ampliamente observada por la sondas Pioneer de la NASA a finales de los años 1970.

Los vientos que soplan en la dirección Norte-Sur suelen tener velocidades de entre 20 y 40 km/h. Sin embargo, las características principales de la circulación atmosférica en Venus no permanecen constantes, se ha observado que pueden variar con escalas de tiempos típicas de varios años terrestres.

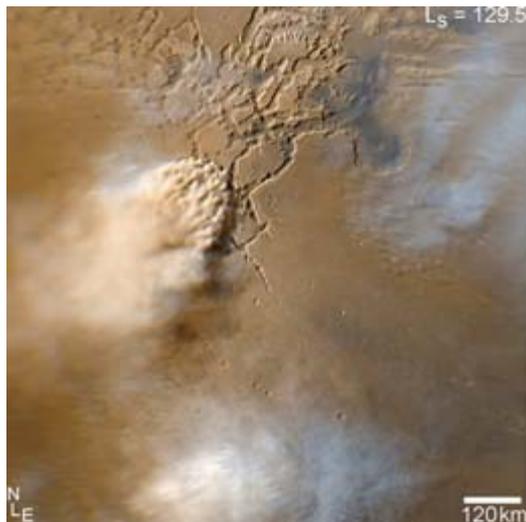
La alta temperatura de la superficie de Venus impide la presencia de vapor de agua en su atmósfera, pero permite la presencia de dióxido de azufre (SO_2). En las capas altas, abundan las moléculas de ácido sulfúrico (H_2SO_4) que forman nubes.

La rotación de Venus es, todavía hoy, un gran misterio. Venus no sólo rota mucho más lentamente que la Tierra, sino que lo hace en sentido contrario (en Venus el Sol sale por el Oeste y se pone por el Este). Debido a su cercanía al Sol, las fuerzas gravitatorias de marea ejercidas por nuestra estrella sobre el planeta pueden haber jugado un papel importante en su frenado. Pero, por otro lado, las fuerzas de «marea» térmicas (esto es, las diferencias de temperatura ocasionadas entre las regiones del planeta más cercanas y más lejanas al Sol) deben contribuir a la aceleración de los vientos en la atmósfera, un efecto

que debe hacerse más importante según el planeta se fue frenando, y que va en sentido contrario al de las mareas gravitatorias. Por tanto, quizás los vientos han impedido que Venus gire aún más lentamente de lo que lo hace hoy.

3. TORMENTAS DE ARENA EN MARTE

Conocer la climatología de Marte es importante no solo por su relación con la de la Tierra, sino por su decisiva influencia en las misiones (hoy robóticas, pero algún día tripuladas) que el hombre envía al pequeño planeta rojo.



Tormenta de polvo en Marte / NASA

La atmósfera de Marte tiene una densidad cien veces menor que la de la Tierra. En su composición domina el dióxido de carbono (95 % en número de partículas) y se encuentran pequeñas cantidades de nitrógeno molecular, argón, oxígeno molecular y vapor de agua. La temperatura de la superficie de Marte oscila entre los 20 ° C en verano y los 140 ° C bajo cero que pueden experimentar las regiones polares en las noches de invierno. Naturalmente, estas temperaturas relativamente altas (dada la distancia de Marte al Sol) son causadas por el efecto invernadero producido por el CO₂ atmosférico, al que se añade la absorción de luz infrarroja debida a las partículas de polvo que se encuentran en suspensión en la atmósfera.

El alto contraste de temperaturas entre el ecuador y los polos está ocasionado por la mayor cantidad de radiación solar que se recibe en el ecuador. En Venus o en la Tierra, los vientos creados por estos gradientes latitudinales de iluminación son capaces de transportar calor desde el ecuador a los polos (debido a la ya mencionada circulación de Hadley), pero en Marte la atmósfera es tan tenue que el correspondiente transporte de calor no ayuda a disminuir el fuerte gradiente latitudinal de temperatura que permanece muy acusado.

Un fenómeno de circulación específicamente marciano es el denominado «Flujo de condensación». Debido a las bajas temperaturas, el CO₂ se condensa a altas latitudes cuando llega el invierno a un hemisferio. La correspondiente disminución gaseosa en esa región origina una gran circulación a escala planetaria que transporta calor, masa y momento hacia la región polar en la que ha llegado el invierno. En Marte, este «flujo de condensación» es un fenómeno dominante sobre las ondas baroclínicas que, sin embargo, son tan importantes en la Tierra.

Otro fenómeno importante en la circulación atmosférica de Marte son las mareas térmicas inducidas por los fuertes gradientes diarios de temperatura. En efecto, la atmósfera

es tan tenue que cuando el Sol deja de iluminar una zona del planeta, la temperatura disminuye ahí por decenas de grados. Se crean así grandes vientos que soplan sobre la superficie de Marte en la dirección de la puesta de Sol.

El polvo y la arena juegan un papel importante en la climatología de Marte. Como el grado de humedad de la superficie es muy bajo, las partículas de material sólido se levantan con mucha facilidad de la superficie y los vientos forman así grandes tormentas de arena. En términos más cuantitativos, cuando la velocidad del viento supera los 200 km/h, se ponen en movimiento las partículas de tamaño mayor de unas 100 micras.

Tales tormentas son un gran peligro para los vehículos todo-terreno que recorren hoy parte del planeta rojo. Las grandes tormentas marcianas suceden sin regularidad aparente (contrariamente a lo que sucede, por ejemplo, con el fenómeno de El Niño en la Tierra), pero puede observarse un centenar de tormentas locales de polvo a lo largo de cada año marciano (que tiene doble duración que el terrestre). Algunas de estas tormentas de polvo pueden crecer en unos cuantos días y alcanzar una escala prácticamente global, el planeta se envuelve entonces en una densa capa de polvo. Tales tormentas colosales duran unas semanas y, cuando los vientos cesan, las partículas sólidas van depositándose nuevamente sobre la superficie. En las regiones polares, las partículas de polvo suspendidas en la atmósfera pueden actuar como semillas en las que se condensan moléculas de CO_2 para formar copos de nieve que caen al suelo más rápidamente que las partículas de polvo de las regiones ecuatoriales.

Los tornados de Marte son muy espectaculares. Cuando el Sol calienta una zona de la superficie en la que se hace el día, grandes bolsas de aire caliente se elevan y pueden adquirir un movimiento rotatorio. En la Tierra, los contrastes de temperatura entre grandes bolsas de aire frío y caliente pueden crear remolinos (a veces llamados «diablos de polvo») que alcanzan centenares de metros de altura, pero los remolinos en Marte pueden alcanzar varios kilómetros de altura.



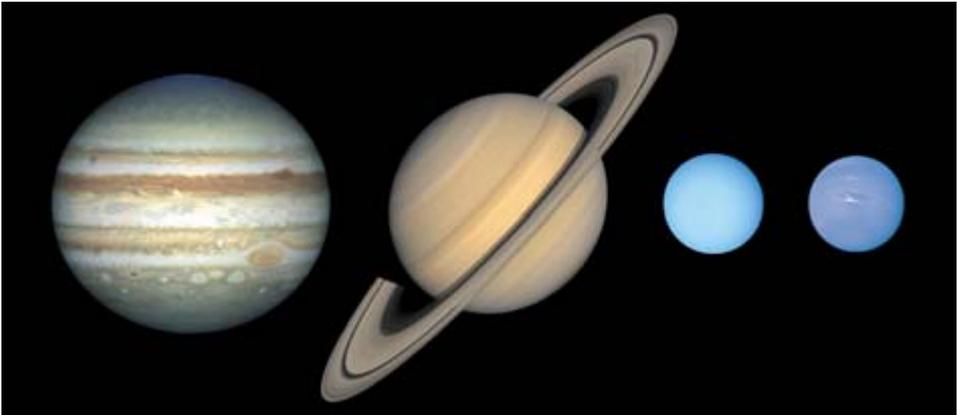
*Nubes cerca del Monte Olimpo /
NASA*

Las nubes son corrientes en Marte, sus sombras se observan a menudo en las imágenes del planeta. Particularmente frecuentes son las nubes en las cercanías del Monte Olimpo que, con una altura de unos 23 kilómetros, es el volcán más alto de todo el sistema solar.

4. METEOROLOGÍA DE LOS PLANETAS GIGANTES

Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno no sólo son diferentes de los planetas rocosos por sus mayores tamaños. Estos planetas gigantes mantienen grandes cantidades de elementos ligeros (hidrógeno y helio, sobre todo) en sus atmósferas, elementos que no condensan a

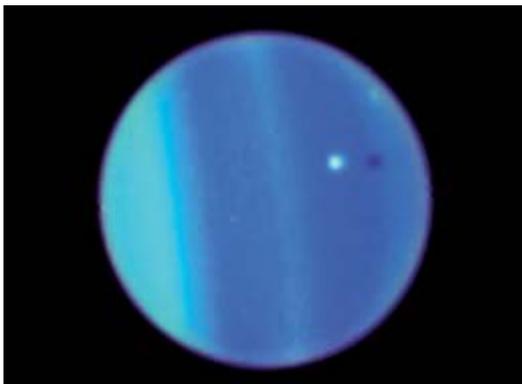
las temperaturas típicas del sistema solar. Por ello, estas grandes esferas gaseosas no contienen superficies sólidas, las densas atmósferas esconden las regiones interiores calientes donde el estado gaseoso se confunde con el líquido.



Los cuatro planetas gigantes / NASA

Las capas externas de los planetas gigantes contienen nubes de diferentes colores indicando diferentes composiciones químicas. Tanto en Júpiter como en Saturno las nubes de menor altitud están formadas por gotas de agua (H_2O), y según progresamos en altura, las nubes pasan a estar constituidas predominantemente por cristales de hidrosulfuro de amonio (NH_4SH) y, más arriba, por amoniaco helado (NH_3). En las atmósferas más frías de Urano y Neptuno, estas tres capas de nubes se encuentran a más bajas altitudes, y las temperaturas son tan extremadamente bajas que incluso el metano (CH_4) se congela y, así pues, una capa más externa en estos planetas contiene nubes de metano.

Como en la Tierra, la iluminación diferencial por luz solar sobre los planetas gigantes crea gradientes de temperatura que, a su vez, ocasionan grandes vientos. También como en la Tierra, las atmósferas de los planetas gigantes están compuestas por grandes bandas de nubes a latitud constante. Estas bandas se observan con gran claridad en Júpiter, Saturno e

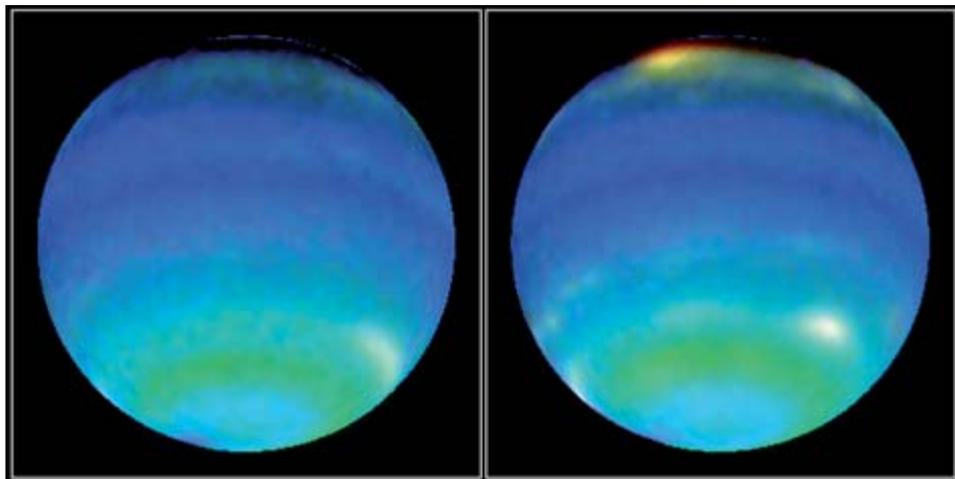


Bandas en Urano y el satélite Ariel observados por el Hubble / NASA,ESA

incluso en el lejano Neptuno, que están calentados más fuertemente (por la radiación solar) en sus regiones ecuatoriales. En Urano, las bandas se ven con menos claridad debido a que el eje de giro de este planeta está contenido en el plano de la eclíptica. Pero a pesar de estar calentado principalmente por los polos, Urano también presenta una clara estructura en forma de bandas latitudinales.

Sobre las bandas de circulación terrestres se encuentran grandes tormentas ciclónicas, sistemas de baja temperatura que pueden formar gran-

des huracanes sobre la superficie de los océanos. Estos huracanes se debilitan o incluso desaparecen cuando llegan a tierra pues aquí pierden su fuente de energía (el agua oceánica caliente). De manera similar, se forman colosales tormentas en las grandes bandas de circulación de los planetas gigantes, pero al no haber superficies sólidas sobre las que debilitarse, estas grandes tormentas y huracanes pueden prosperar sobre largos periodos de tiempo, como sucede por ejemplo en el caso de la Gran Mancha Roja de Júpiter (una tormenta que ya dura ¡varios siglos terrestres!).



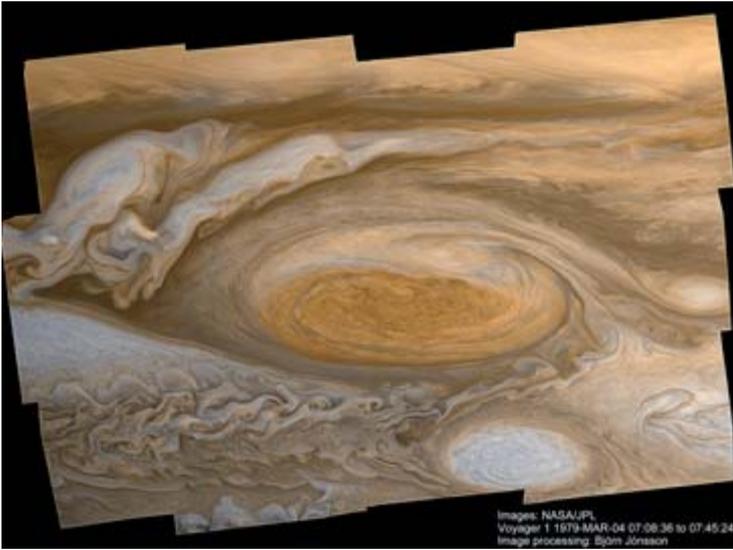
Bandas y nubes en Neptuno observadas por el Hubble / NASA,ESA

Las bandas de circulación de los planetas gigantes son muy estables y giran en torno al planeta de manera tal que dos zonas consecutivas se mueven en sentidos opuestos. Las zonas de interfase entre bandas consecutivas son las más favorables para la formación de estas descomunales tormentas.

Aparte de los grandes vientos (que en Júpiter pueden alcanzar las vertiginosas velocidades de 800 kilómetros por hora) y las colosales tormentas, los planetas gigantes presentan otros espectaculares fenómenos atmosféricos. De manera similar a lo que sucede en la Tierra, el bombardeo de partículas cargadas provenientes del Sol crea multicolores auroras. También el aparato eléctrico (en forma de relámpagos y rayos) es particularmente rico al menos en Júpiter.

5. LA MADRE DE TODAS LAS TORMENTAS

Las bandas de circulación de Júpiter incluyen 6 cinturones mayores de color oscuro y 7 zonas claras. Cerca del borde inferior del cinturón oscuro de la región ecuatorial sur se encuentra la Gran Mancha Roja (GMR), una colosal tormenta que cubre una región de unos 12.000 kilómetros en la dirección Norte-Sur (similar al tamaño de la Tierra) y unos 30.000 kilómetros en dirección Este-Oeste. Sin duda la mayor tormenta del sistema solar. El gas gira en la mancha en el sentido contrario a las agujas de un reloj generando unas violentas



La Gran Mancha Roja | NASA/JPL, Björn Jónsson

corrientes de chorro al sur y al norte de la mancha. En las regiones externas de la periferia de la mancha, las inestabilidades hidrodinámicas crean complejas estructuras rizadas.

El color rojizo de la gran mancha es aún un misterio. Su causa debe buscarse en la composición química del gas, quizás se deba a una sobreabundancia de fósforo o de compuestos de azufre, o quizás a compuestos orgánicos por determinar. También se desconoce el tiempo que perdurará esta descomunal tormenta.

La primera observación de la Gran Mancha Roja se atribuye a Robert Hooke (1635-1703) en 1664. Hooke fue un filósofo, astrónomo, matemático y arquitecto que jugó un papel importante durante la revolución científica (entre sus trabajos de arquitectura destaca el primer edificio del Observatorio de Greenwich y, en colaboración con Christopher Wren, la Catedral de San Pablo en Londres). La GMR se conoce pues desde hace más de 300 años, pero podría ser bastante más antigua.



Júpiter e Io | NASA/JPL - Caltech

En torno a la región sur de la GMR, en 1938 se observaron otras manchas de forma oval pero de color blanco (denominadas BC, FA y DE). En el año 2000 se observó la oval BA como resultado de la fusión de otras tres menores, esta mancha se hizo entonces roja (por lo que a veces se la conoce como la GMR Jr.)

La larga duración de estas grandes estructuras y el mecanismo energético por el que se alimentan no se comprenden todavía del todo. Si las manchas fueran similares a gi-

gigantescos tornados, la energía podría provenir de capas interiores gracias a células convectivas gigantes que podrían crearse según los gases condensan en regiones interiores. Pero otros mecanismos, como la absorción de estructuras menores o los diferentes tipos de inestabilidades hidrodinámicas en las zonas de interfaz entre corrientes sucesivas, también podrían jugar un papel importante en la alimentación de tales tormentas.

También en Saturno y en Neptuno se conocen grandes manchas (en Urano, la observación es más dificultosa al tener su eje de rotación contenido en la eclíptica). En el capítulo siguiente de este artículo describimos las grandes tormentas de Saturno que aparecen en la forma de «Grandes Manchas Blancas».

En Neptuno, el planeta más distante del Sol, en el que la temperatura puede caer por debajo de los 220 grados Celsius bajo cero, la velocidad de los vientos puede superar los 2.000 kilómetros por hora, se trata pues de los vientos más violentos del sistema solar. La sonda Voyager 2 descubrió en 1989 la denominada «Gran Mancha Oscura» (GMO), un sistema anticiclónico de cubre un área de unos 13.000 x 6.000 kilómetros, pero que no parece tener tanta estabilidad como la GMR de Júpiter, pues el telescopio espacial Hubble no ha vuelto a localizar esta GMO varios años después de la observación realizada por el Voyager 2. Otras manchas blancas han sido observadas cerca del polo sur de Neptuno, posiblemente se trata de tormentas de tipo convectivo ocasionadas por los gradientes de temperatura que tienen su origen en el calor interno del planeta (Neptuno radia una energía que es 2,6 veces mayor que la que recibe del Sol).

6. TORMENTAS RECIENTES EN SATURNO

Ya hemos mencionado que, de manera similar a Júpiter, en Saturno también se forman grandes tormentas que aparecen como manchas brillantes. Tales manchas crecen rápidamente ocupando áreas cada vez mayores sobre la atmósfera y, al ser arrastradas por los vientos, se hacen cada vez más irregulares. En las regiones más profundas de la atmósfera de Saturno, donde abundan las nubes de agua, se generan unas tormentas conocidas como «Grandes Manchas Blancas» que han sido ampliamente estudiadas por el astrónomo español Agustín Sánchez-Lavega (ver bibliografía). Estas tormentas se ocasionan una vez en cada año de Saturno (que equivale a unos 29,5 años terrestres), pero las más espectaculares han tenido lugar en regiones próximas al ecuador y parecen suceder cada dos años saturninos. Particularmente significativas fueron las de los años 1876, 1933 y 1990.



Tormenta en Saturno en diciembre de 2010 | Cassini, NASA/JPL, ESA

El 5 de diciembre del año 2010 se desencadenó una de estas grandes tormentas en el Hemisferio Norte de Saturno. El seguimiento realizado del fenómeno mostró muy bien cómo la mancha fue creciendo horizontalmente hasta alcanzar un tamaño superior a los 10.000 kilómetros, es decir se trata de un fenómeno de escala verdaderamente planetaria.

Según el modelo de Sánchez-Lavega y colaboradores, esta gran mancha blanca se produce por la irrupción de una columna de gases calientes que asciende en forma de gigantesco chorro desde la zona profunda de la atmósfera planetaria (donde se encuentran las nubes de

vapor de agua). El incremento de temperatura tendría su origen en el calor interno del planeta. Es muy notable que tales tormentas no afecten a los vientos que soplan en los paralelos contiguos del planeta.

7. TITÁN Y OTROS CUERPOS DEL SISTEMA SOLAR

De las atmósferas de otros cuerpos del sistema solar, la más estudiada es la de Titán, una luna de Saturno particularmente interesante pues en algunas de sus características parece ser similar a la Tierra en los momentos iniciales de su formación. Estudiar Titán sirve, por tanto, para estudiar la evolución de nuestro planeta.

El 14 de enero de 2005 la sonda Huygens (que había sido desprendida de la nave Cassini el 25 de diciembre anterior) penetró en la atmósfera de Titán equipada con un laboratorio y un paracaídas para amortiguar la caída sobre la superficie de este mundo helado. Las baterías contenían la energía justa para las tres horas que duró el descenso y el «aterrizaje». Durante ese corto periodo de tiempo la Huygens fue tomando todo tipo de datos y transmitiéndolos a la Cassini que, a su vez, reenviaba todo a los centros de control en la Tierra. Los mayores radiotelescopios del planeta también apuntaron hacia Huygens y midieron su trayectoria de caída con



Cantos rodados en Titán y en la Tierra | NASA/JPL/ESA/Univ. Arizona, S. Matheson

altísima precisión mediante Interferometría de Muy Larga Base (VLBI).

La superficie de Titán parecía encontrarse atravesada de largos canales que desembocan en grandes superficies de color oscuro anaranjado. Inicialmente se pensó que tales superficies eran lagos o mares. Pero el sitio del aterrizaje de la sonda fue precisamente uno de estos lugares oscuros que no estaba ocupado por un líquido, sino que se trataba de un paraje seco salpicado por aquí y por allá por charcos de agua helada o por grandes áreas recubiertas de metano. Fotografías de la superficie del satélite revelan la presencia de cantos rodados. Aunque la composición de estos guijarros es desconocida (podrían ser trozos de algún tipo de hielo), su forma redondeada recuerda mucho a los cantos rodados terrestres, lo que sugiere que la erosión por líquidos en la superficie de Titán puede (o ha podido) ser muy importante.

Más recientemente, un equipo de astrónomos liderado por E. Turtle, analizando datos tomados por la sonda Cassini, comprobó que, tras el paso de nubes por el ecuador de Titán, se observaban repentinas disminuciones en el brillo superficial de una gran extensión. El equipo concluyó que se trataba de grandes precipitaciones de metano en estado líquido que podían afectar a un área de unos 500.000 kilómetros cuadrados (comparable al de la Península Ibérica). Estas grandes lluvias podrían producirse de manera estacional y ser las causantes de los cauces secos y de otros signos de erosión que se observan sobre la superficie del satélite.

Finalmente, señalemos que también el planeta enano Plutón posee una fina atmósfera compuesta por nitrógeno, monóxido de carbono y metano. La meteorología de este pequeño cuerpo



Recreación del paisaje helado en Plutón | NASA, ESA, G. Bacon

(1,5 veces más pequeño y 5 veces menos masivo que la Luna) está dominada por su gran distancia al Sol (Plutón está, en término medio, 39 veces más lejos del Sol que la Tierra) y por su órbita muy elíptica (con un periodo de unos 248 años terrestres). Su emplazamiento hace que la atmósfera se congele en invierno cuando la temperatura desciende por debajo de los 230 grados Celsius bajo cero, pero que se evapore parcialmente en su verano, cuando la temperatura alcanzan los 210 grados Celsius bajo cero, momento en el que debe crearse un frío viento.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La meteorología terrestre ha experimentado una auténtica revolución en los últimos años. Las predicciones son actualmente de gran fiabilidad y su grado de precisión, tanto geográfica como temporal, nos resulta verdaderamente asombroso. Naturalmente un factor de este éxito radica en la observación desde plataformas espaciales pero, además, los modelos teóricos de la atmósfera terrestre incluyen cada vez un número mayor de parámetros y un nivel de creciente complejidad.

Tales modelos numéricos también pueden ser utilizados para el estudio de la evolución de algunos de los componentes químicos atmosféricos. Por poner un ejemplo que interesa mucho en la actualidad, se puede simular así la evolución del contenido en dióxido de carbono y el consiguiente incremento del efecto invernadero. Nuestra breve discusión de la meteorología de otros planetas del sistema solar nos confirma que la planetología comparada puede ser de mucha ayuda en este contexto: el efecto invernadero más acusado de los conocidos se da en la atmósfera de nuestro vecino Venus, una atmósfera que, como hemos visto, está compuesta por un 96 % (en número de partículas) de dióxido de carbono. Así pues, un modelo de la atmósfera terrestre puede ser puesto a prueba, en otras condiciones físico-químicas, utilizando medidas de Venus y tratando de reproducir los efectos que allí se observan.

Otro ejemplo también interesante lo proporcionan las grandes bandas de circulación latitudinales que existen en la Tierra, pero que, tal y como hemos mostrado aquí, se observan con mucho mayor contraste y de manera mucho más espectacular en los planetas gigantes gaseosos y, muy particularmente, en Júpiter.

Pero más allá del interés relativo a nuestra propia atmósfera, la meteorología de otros planetas del sistema solar se revela como una herramienta de gran potencial para el diagnóstico de las condiciones físico-químicas de estos cuerpos. De manera similar, sería deseable poder estudiar un día los fenómenos meteorológicos en planetas extrasolares. Y quizás no estemos tan lejos de ello. De hecho, un estudio reciente realizado por Knutson y colaboradores (ver bibliografía) sugiere la existencia de vientos de hasta 10.000 km/h, soplando hacia el este, en el planeta extrasolar HD189733b, que se encuentra a unos 63 años luz de la Tierra.

BIBLIOGRAFÍA

- Encrenaz, T.: 1999, *The Astronomy and Astrophysics Review* 9, 171.
- Ingersoll, A.P.: 1987, *Scientific American* 256, 38.
- Kasting, J.F., Toon, O.B., Pollack, J.B.: 1988, *Scientific American* 258, 90.
- Kelly Beatty, J., Collins Petersen, C., Chai-kin, A., Eds. 1999, «The New Solar System». Cambridge University Press.
- Knutson, H.A., Charbonneau, D., Allen, L.E., et al. 2007, *Nature*, 447, 183.
- Sánchez-Lavega, A., Colas, F.; Lecacheux, J., et al.: 1991, *Nature* 353, 397.
- Sánchez-Lavega, A., del Río-Gaztelurrutia, T.; Hueso, R., et al.: 2011, *Nature* 475, 71.
- Turtle, E.P., Perry, J.E., Hayes, A.G., *et al.* 2011, *Science* 331, 1414.