



Visiones de Gaia: La Tierra desde el Espacio

David Barrado Navascués



MINISTERIO
DE DEFENSA





David Barrado Navascués

Nació en Madrid en 1968. Obtuvo la licenciatura en Ciencias Físicas, especialidad de Astrofísica, en la Universidad Complutense de Madrid. En esa misma universidad inició la investigación que condujo a su doctorado, aunque la terminó en el Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) en Cambridge (EE UU). Luego dedicó varios años como investigador postdoctoral en diferentes instituciones de Estados Unidos (incluyendo una beca de programa Ful-

bright durante dos años en el CfA), Alemania (Max-Planck Institut für Astronomie, en Heidelberg) y España (Universidad Autónoma de Madrid). Ha trabajado en el Centro Europeo de Astronomía Espacial (ESAC) como miembro del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

Dentro del equipo del INTA ha sido el investigador principal de MIRI, el instrumento para el infrarrojo medio que volará en el próximo telescopio espacial, el JWST. Con posterioridad se incorporó como miembro de plantilla en el Centro de Astrobiología (CAB), un instituto mixto constituido por la agencia espacial española (INTA) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Además, durante dos años fue responsable del Laboratorio de Astrofísica Estelar y Exoplanetas, como parte integrante del CAB.

Desde comienzos del año 2010 es el director del Centro Astronómico Hispano-Alemán de Calar Alto.

Sus intereses como investigador se centran en el estudio de las propiedades de las estrellas de los cúmulos abiertos, así como en la búsqueda y caracterización de objetos subestelares y exoplanetas. En un marco más general se ha especializado en el estudio de la formación estelar y de sistemas planetarios por medio de distintas técnicas observacionales: desde la luz visible al infrarrojo lejano, a través de imágenes y espectroscopia, con telescopios emplazados tanto en el suelo como en el espacio. Todo este esfuerzo observacional ha producido cerca de cien artículos en revistas científicas de prestigio.

Otros libros de divulgación por el mismo autor

Bitácora Estelar: navegando por múltiples universos, por D. Barrado y B. Montesinos, editado por Equipo Sirio.

ISBN: 9788495495945

«Un libro de divulgación científica diverso, innovador y de agradable lectura, que trae una nueva y original visión de los más recientes resultados de la astronomía moderna».

Gael Chauvin. *Investigador Observatorio de Grenoble, Francia. Descubridor del primer planeta por imagen directa*

«¡Qué original e inspiradora aproximación a la Astronomía!

Los autores presentan una variedad de diferentes aspectos de la investigación astronómica actual, enmarcándola en sus contextos sociológicos y culturales. Las temáticas cubiertas lo son con pulcritud y precisión, pero es la mezcla de comentarios personales, experiencias y visión individual lo que hace de esta bitácora una experiencia enriquecedora y única. Una forma no convencional de trasladar el entusiasmo por la astronomía».

Dr. Michael F. Sterzik. *Director del Observatorio de La Silla, European Southern Observatory, Chile*

ASTROBIOLOGÍA. Sobre el origen y evolución de la Vida en el Universo, varios autores, editado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

«Colección Divulgación» del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (en preparación).

Contracubierta:

1. El módulo de descenso «Eagle» del Apollo 11 regresando al módulo de mando, después de haber visitado la Luna, el 21 de Julio de 1969.
2. La Tierra y la Luna observadas desde la nave MESSENGER en su camino a Mercurio. Créditos: NASA.
3. Las fases de la Luna y la Tierra desde la sonda Mariner 10, a 2,6 millones de kilómetros, lanzada por NASA en 1973.
4. El Sistema Solar a escala. Créditos: SOHO, Messenger, Venus Express, Apollo XVII, HST y Voyager.
5. Créditos: CAHA, Descubre, DSA, OAUV. Vicent Peris (OAUV/DSA/PixInsight), Jack Harvey (SSRO/DSA), Steven Mazlin (SSRO/DSA), Carlos Sonnenstein (Valkànik/DSA) y Juan Conejero (PixInsight/DSA).



Visiones de Gaia: La Tierra desde el Espacio

David Barrado Navascués

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas»

Los derechos de esta obra están amparados por la Ley de Propiedad Intelectual. No podrá ser reproducida por medio alguno, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, sin permiso previo de los titulares del © Copyright.

© David Barrado Navascués

© Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas»

Edita:



NIPO: 078-10-003-1

ISBN: 978-84-930056-6-5

Depósito Legal: M-51020-2010

Diseño y Arte: Susana Gil y Vicente Aparisi

Tirada: 2.000 ejemplares

Fecha de edición: Diciembre 2010

Imprime: Imprenta Nacional del Boletín Oficial del Estado



*A mis sobrinos,
para que ellos tengan un futuro mejor que el que intuyo.*

«...Dadme las naves y adaptadme las velas al viento celeste; habrá gente que no tendrá miedo ni siquiera de cara a aquella inmensidad. Y para estos descendientes que ya dentro de muy poco se aventurarán por estos caminos preparemos, oh Galileo, yo una astronomía lunar y tú una joviana».

Kepler a Galileo en *Dissertatio cum Nuncio Sidereo*.

índice

Prefacio	9
--------------------	---

PARTE I: LA PRIMERA VISIÓN CIENTÍFICA DEL MUNDO

Geografía del viejo y del nuevo mundo	11
Alzando el vuelo: las primeras cartografías aéreas y por satélite	13

PARTE II: LA TIERRA DESDE EL ESPACIO

Una mirada cercana	15
Las múltiples facetas del planeta Tierra.	15
Los cuatro elementos: Tierra, Fuego, Agua y Aire	16
Las nubes y el balance térmico del planeta	19
La evolución de la atmósfera terrestre	20
Observando al observador: volcanes y telescopios en Hawaii	20
Nuestro planeta en tres dimensiones	21
Caos y creación en los desastres naturales	25
Groenlandia, el inlandsis y el océano Ártico	27
El glaciar del Baltoro y la cumbre del K2 en Pakistán.	29
Las cicatrices de la Tierra: el Gran Cañón del Colorado	30
La Gran Muralla China, las Pirámides y los canales de Marte.	31
La presa de las Tres Gargantas	33
La estructura viva más fácilmente distinguible desde el espacio	34
La estructura artificial más fácilmente detectable desde el espacio	35
¿Cuándo y dónde ocurren las auroras?.	37
Auroras polares: ¿qué son?	41
Más allá de la Tierra: auroras en el Sistema Solar	43
Mármol azul.	45
Un eclipse lunar desde el espacio: el efecto sobre la Tierra	46
Mirando desde el otro lado: el eclipse total de Sol desde el espacio	46

PARTE III: LA ACTIVIDAD HUMANA, EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS CONSECUENCIAS

Cambio climático	47
Las predicciones de Casandra.	48
El papel del dióxido de carbono y del ozono.	49
La evolución de la temperatura media y los ciclos solares de actividad	50

El Paso del Noroeste, en el Ártico, abierto por primera vez	53
La contaminación vista desde el espacio: la visión global	55
La Astronomía, la contaminación lumínica y la degradación del planeta	56
Desastres ecológicos desde el espacio: el mar de Aral	57
Vigilando desastres ecológicos: el caso del petrolero Prestige	58

PARTE IV:
LA TIERRA EN EL SISTEMA SOLAR

El Sistema Solar	59
¿Qué es un planeta?	61
Exoplanetas: La zona de habitabilidad y la búsqueda de vida más allá del Sistema Solar	62
La Tierra y Marte: ¿gemelos o hermanastros?	65
Biomarcadores y presencia de vida: Venus, la Tierra y Marte	68
Ese pálido punto azul (I): la Tierra desde la Luna	71
Ese pálido punto azul (II): naves en tránsito	72
Ese pálido punto azul (III): Marte	73
Ese pálido punto azul (IV): las fases de la Tierra	74
Ese pálido punto azul (V): Saturno	76
Ese pálido punto azul (VI): confines del Sistema Solar	77

PARTE V:
ALLENDE LOS MARES SIDERALES

El pasado del Sol y del Sistema Solar	79
Un verdadero Sistema Planetario a 40 años luz	81
Récords interplanetarios	82
Primera imagen directa de un sistema planetario orbitando una estrella	85
Fomalhaut: el ojo del gato nos hace un guiño	86
El planeta de la estrella Beta Pictoris y el tamaño de los diversos sistemas planetarios	87
Biomarcadores: vida en la distancia	88
Desde otro brazo de la Galaxia	90
En el centro de la Vía Láctea	91
Érase una vez una galaxia espiral	93
Los confines del Universo	98
Epílogo	99



Prefacio

■ El cúmulo estelar de Las Pléyades, las siete hermanas de la mitología griega. La imagen está compuesta por varias tomadas con el telescopio espacial Spitzer a diferentes longitudes de onda, siempre en el rango infrarrojo del espectro electromagnético, no visible por el ojo humano.

Créditos: NASA/JPL/Caltech/J.R.Stauffer.

Cuando se contempla la evolución del ser humano, su historia sobre este planeta, se puede tener la sensación de que hay un desarrollo lineal, casi diríamos un progreso permanente, una marcha hacia algún sitio, aunque no sepamos muy bien cuál es ese destino. Una escalera de peldaños irregulares, pero, parecería, casi siempre ascendente. El símil está favorecido por las impresiones que nos proporcionan ciencia y tecnología y, probablemente, también por la filosofía, al menos desde la perspectiva occidental. Las tres disciplinas se encuentran interrelacionadas de una forma curiosa, en una carrera de relevos en la que nunca se sabe cuál lidera y cuál sigue, dentro de ese fenómeno que denominamos cultura. En ocasiones un inesperado adelanto técnico provoca una revolución científica, o es la filosofía la que cambia el paradigma y permite un cambio radical en nuestra manera de ver el mundo. Son saltos cualitativos que mirados con más detalle no son siempre tan positivos como pudieran parecer.

Creo que en estos momentos nos encontramos ante una de esas situaciones críticas, que pudieran dar lugar a un verdadero giro, un cambio en el papel que representamos, de la visión que de nosotros mismos tenemos y de nuestro lugar en el mundo. No detallaré los avances científicos y tecnológicos que se han realizado en las últimas décadas, desde biología molecular pasando por la ubicuidad de las comunicaciones instantáneas. Me ceñiré al caso que conozco más en profundidad: la astrofísica, centrándome en un caso concreto, que forma parte del motivo de este libro: los planetas más allá del Sistema Solar.

Cuando escribo estas líneas solo han transcurrido 15 años desde el anuncio del descubrimiento del primer planeta que orbita alrededor de una estrella de tipo solar, denominada 51 Pegasi. Son ya cientos de sistemas estelares identificados, con una extraordinaria variedad. Tal es la diversidad existente dentro del zoo exoplanetario que se me antoja que los límites de nuestra imaginación se nos han quedado cortos. Y tanto han avanzado las técnicas que se usan para su descubrimiento y estudio que, a pesar de estar ocultos por el brillo de la estrella central, incluso podemos echar un vistazo (somero, eso sí) a las propiedades de los planetas en sí: desde sus masas, radios y posibles composiciones, hasta las propiedades de sus atmósferas, en algunos casos específicos.

Sí, de alguna manera parece que el binomio ciencia + tecnología cumple la promesa de Prometeo, nos da el conocimiento del Universo, el poder secreto de los olímpicos. Pero no podemos olvidar que todo poder implica

una gran responsabilidad. Necesitamos ese tercer apoyo que realmente proporcione estabilidad: la filosofía (el amor a la sabiduría, después de todo), pues creo que nos encontramos ante peligros muy reales, que nos pueden llevar a abortar las extraordinarias posibilidades que ahora se nos abren.

Me refiero, por supuesto, a la sobre-explotación de los recursos naturales, al uso irresponsable de nuestro planeta. La crisis, que antes parecía tan lejana, ahora nos acecha muy de cerca. El desastre que puede representar el cambio climático está aquí, y es de carácter global y profundo.

Basándome en impresionantes imágenes de nuestro planeta tomadas con diferentes satélites, he reflexionado sobre diferentes temáticas, que van desde las propiedades de la Tierra, el cambio climático, el Sistema Solar y los análogos planetarios más allá de él. Es un viaje que nos sirve para intentar reinterpretar cuál es el lugar de nuestro planeta en el Cosmos, mediante el uso de un lenguaje muy visual.

Con este libro quería aunar dos de las experiencias que más me han marcado, vivencias que en un principio parecerían bien alejadas. La primera es el placer, casi físico, de investigar, de descubrir. Recuerdo una ocasión en la que estaba analizando imágenes de campos de estrellas en el cúmulo de las Pléyades, una asociación estelar relativamente cercana. Fueron semanas dedicadas a un monótono procesado de datos, pero en un momento dado me di cuenta de que era yo el primer ser humano que estaba viendo aquellas estrellas, que era terreno nunca hollado antes por nadie más. Sentí, quiero creer, algo parecido a aquellos pioneros que salieron de nuestra cuna en África para adentrarse en terreno ignoto. Entonces mis largas semanas de tedio cobraron sentido. La segunda experiencia fue mucho más cercana, en un parque natural del Congo, visitando a los casi extintos gorilas de montaña. Son éstos animales magníficos, que cuando se miran directamente a los ojos difícilmente se pueden distinguir de los seres humanos, tal es su proximidad a nosotros. Durante la escasa hora que pasamos con una familia de gorilas, a pesar de la distancia que debíamos mantener con los miembros de la misma, un joven se me acercó y, para mi sorpresa, me tomó la mano. Me sorprendió la suavidad de la misma, su calidez. Casi tanto como la reacción del padre, un fabuloso macho varias veces mi tamaño, que nos observó durante unos instantes, tal vez decidiendo si realmente éramos una amenaza; se irguió en toda su longitud (y anchura) y sacudiéndose el pecho un par de veces, se dio la vuelta y nos abandonó seguido de todos los miembros de la familia, dejándonos a todos los presentes en la más abso-



■ La impresionante, y muy humana, mirada de un gorila de montaña. Fotografía de Daniel Cano Ott, tomada en el Parque Nacional de Virunga, en la República Democrática del Congo.

luta perplejidad. Ahora que lo pienso, fue como la retirada del mundo natural ante el avance, la invasión, de la civilización.

Yo no sé dónde están los límites de la capacidad del planeta para soportar una compleja sociedad humana, ávida de recursos. Pero creo firmemente que debemos conjugar ambas posibilidades: la capacidad de seguir avanzando, de profundizar en nuestro conocimiento de las leyes naturales y en la aplicación de la tecnología, con el derecho que nosotros y nuestros descendientes tenemos a un mundo en el que la naturaleza tenga un papel importante, más allá de unas pocas áreas reservadas. Espero por tanto que este libro ayude a poner, en cierta medida, a la humanidad en un contexto más amplio, tanto dentro de nuestro planeta como más allá del mismo. Deseo que estas imágenes, verdaderamente impresionantes, me hayan permitido construir un discurso sólido que muestre el maravilloso Universo en el que tenemos el privilegio de vivir, y lo frágil que es nuestro propio mundo, la necesidad de protegerlo.



Parte I

La primera visión científica del mundo

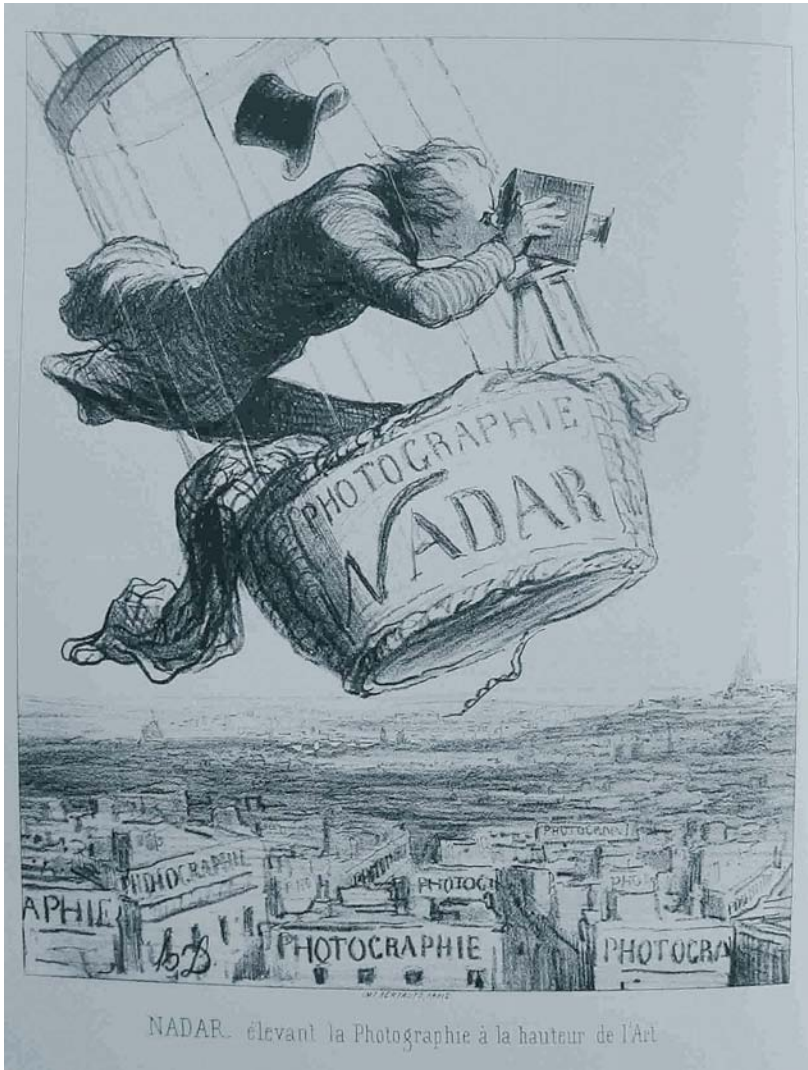
■ Una de las primeras imágenes de la Tierra, obtenida por el Satélite de Observación TIROS-1 el 1 de abril de 1960.

Geografía del viejo y del nuevo mundo

Uno de los mapas que más ha influido en el imaginario de Occidente fue realizado por Claudio Ptolomeo (Claudios Ptolemaios) hace más de 1800 años. Astrónomo, óptico, geógrafo, matemático y teórico de la música egipcio, vivió en el segundo siglo de nuestra era. Entonces Egipto era una provincia romana, pero la tradición erudita griega seguía viviendo allí, en donde destacaba la Biblioteca de Alejandría, cuyos fondos fueron seriamente dañados en los años 48-47 antes de nuestra era durante las guerras civiles del imperio debidas a la ambición de Julio César, y que finalmente sería destruida (el Serapeum) por las turbas cristianas alentadas por el patriarca Teófilo en el año 391. De aquella rica tradición bebería Ptolomeo, uno de los últimos sabios de la antigüedad, quien dejó un inmenso legado en diversas disciplinas que parcialmente ha llegado hasta nosotros y que durante la Edad Media fue parte esencial del cuerpo de conocimiento de Occidente. Entre otros trabajos, publicó un catálogo de objetos celestes, con posiciones precisas de las estrellas visibles, y tablas para calcular la apariencia del cielo en cualquier fecha, que no serán mejoradas hasta la aparición de las Tablas Alfonsinas por la Escuela de Toledo en el siglo XIII (a su vez insuperables hasta 1627). Gran defensor de la teoría geocéntrica (para ser más preciso geostática, la denominada



■ Mapa mundi de Abraham Ortelius.



■ El fotógrafo francés Nadar (seudónimo de Gaspard-Félix Tournachon), en una caricatura publicada por Honoré Daumier en 1862. Nadar tomó la primera foto aérea. Se sirvió de un globo conectado con el suelo, en 1858. Desafortunadamente la foto, del pequeño pueblo de Petit-Becetre, en el valle del Bievre, no ha llegado hasta nosotros. Años más tarde realizaría fotos de diferentes ciudades europeas, como es el caso de la de París en 1868.



■ La fotografía aérea más antigua que se conserva corresponde a la ciudad de Boston, y fue tomada por James Wallace Black el 13 de octubre de 1860.



■ Versión del siglo XV, antes del descubrimiento de América, del mapa de Ptolomeo, realizada por Johannes de Armsshein (Ulm, 1482).

teoría tolemaica), según la cual nuestro planeta estaría en el centro del Universo, inmóvil, una de sus obras más notables fue el *Almagesto* (cuyo nombre original es «sintaxis matemática», más tarde denominada «grandísima» para diferenciarla de otras obras menores, o *maghiste* en griego, y de ahí el *Al-Magesto* árabe).

Este primer mapa no ha llegado hasta nosotros en su versión original, lamentablemente (el mismo Ptolomeo animó a la mejora del mismo). En cualquier caso, para su elaboración, Ptolomeo debió manejar numerosos mapas de la antigüedad.

La Geografía de Ptolomeo influyó en todos los mapas publicados en Occidente hasta 1570, cuando Abraham Ortelius publicó el *Theatrum Orbis Terrarum*, que es, al decir de los expertos, el primer atlas que da cuenta del mundo moderno, con datos actualizados por las exploraciones oceánicas de españoles y portugueses, y que inmediatamente sería emulado por el

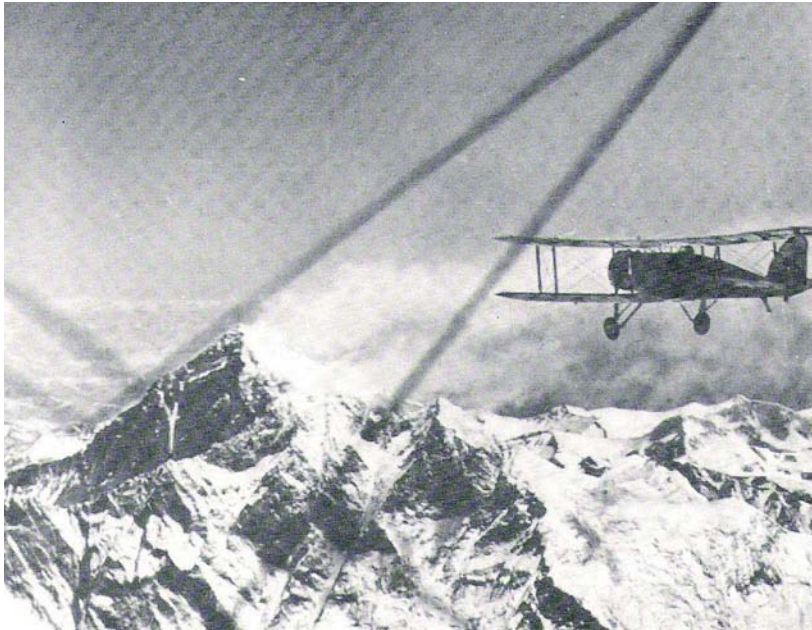
trabajo de Gerhardus Mercator (cuya proyección se sigue utilizando en la actualidad). A pesar de todo, seguimos siendo herederos de Ptolomeo, pues continuamos usando su método para localizar un punto en el globo terrestre (latitud y longitud) y en la esfera celeste.

Alzando el vuelo: las primeras cartografías aéreas y por satélite

Volar... un sueño muy humano, al menos desde los tiempos del mito heleno de Dédalo y su hijo Ícaro. Probablemente la muestra más evidente de la ambición y de la irreverencia del hombre hacia las deidades olímpicas, junto al de Prometeo. Un símbolo de libertad también. Pero, indudablemente, una actividad de gran utilidad para la cartografía y el estudio de los recursos naturales.

El primer uso constatado de la fotografía aérea fue llevado a cabo por Gaspard-Félix Tournachon, periodista y fotógrafo que, siempre atento a avances científicos y tecnológicos, se percató del potencial de la visión desde la altura. En 1858 fotografió el pueblo de Petit-Bicetre desde el globo *El Gigante*, para continuar con posterioridad con una serie de ciudades, entre las que se encuentra, por supuesto, París. Sin embargo, esta primera imagen no se ha conservado, a pesar de que el archivo de placas de Nadar, su nombre literario, guarda 450 000 ejemplares. La ciudad americana de Boston tiene el privilegio de ser la primera cuya imagen aérea se conserva, gracias a James Wallace Black, también desde un aerostato, en 1860. Años más tarde, en 1909, se tomaría la primera fotografía desde un avión, por Wilbur Wright, en las cercanías de Roma. El Everest sería conquistado desde las alturas en 1933, en este caso por Douglas Douglas-Hamilton, Lord Clydesdale.

El verdadero salto se produce con los sistemas a bordo de satélites. El lanzamiento del Sputnik el 4 de octubre de 1957 abrió una nueva vía, que se vería materializada años más tarde con el Explorer VI, el 14 de agosto de 1959. En realidad, la baja calidad de la imagen apenas permite insinuar la presencia del océano Pacífico, cubierto por una capa de nubes, pero fue la prueba palpable de la gran utilidad de la técnica. En la actualidad existen más de tres mil satélites artificiales orbitando nuestro planeta. Gran parte se dedican a la telecomunicación, pero un gran número tiene como misión principal la observación de nuestro planeta: desde la meteorología hasta la cartografía, pasando por la monitorización ambiental. Entre los programas con estos objetivos destacan, por supuesto, la americana NASA con su «Earth Observing System», piedra angular del «Earth Science Enterprise», y el más modesto de la Agencia Espacial Europea (ESA).



■ El monte Everest con el avión de Douglas Douglas-Hamilton, un Westland PV-3, en 1933.



■ La primera fotografía, de muy baja calidad, de la Tierra tomada desde un satélite. Corresponde a la parte central del océano Pacífico y las nubes sobre el mismo, avistados desde una altura de unos 27 000 kilómetros. Fue adquirida con el satélite americano Explorer VI, lanzado el 7 de agosto de 1959, en concreto siete días después, cuando se encontraba sobre Méjico.



Parte II

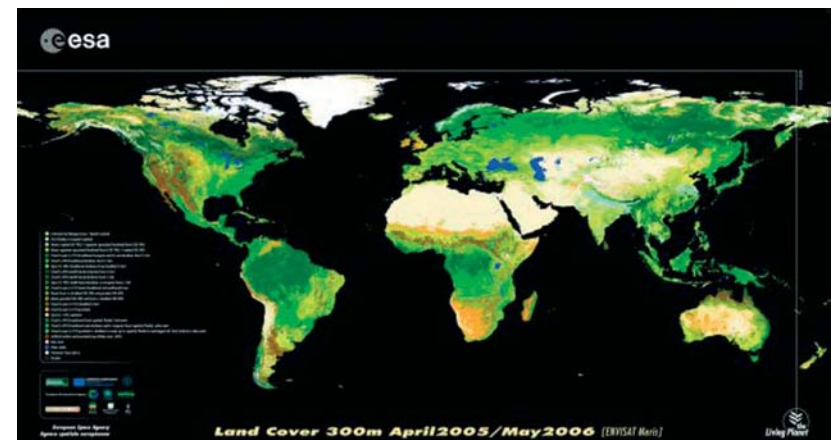
La Tierra desde el espacio

■ Una vista inusual del limbo terrestre y de la atmósfera, en la que claramente se diferencian sus regiones. La imagen fue tomada desde la Estación Espacial Internacional el 25 de mayo de 2010. Créditos: W. L. Stefanov y NASA-JSC.

Una mirada cercana

El mapa mundi adjunto, el de mayor resolución espacial obtenido hasta la fecha de la superficie global de la Tierra, es fruto de una colaboración entre la FAO (un organismo de Naciones Unidas) y la Agencia Espacial Europea (ESA). Con un detalle extraordinario, muestra diferentes tipos de cobertura del suelo: desde los áridos desiertos saharianos a la riqueza amazónica, pasando por las frías islas del Ártico.

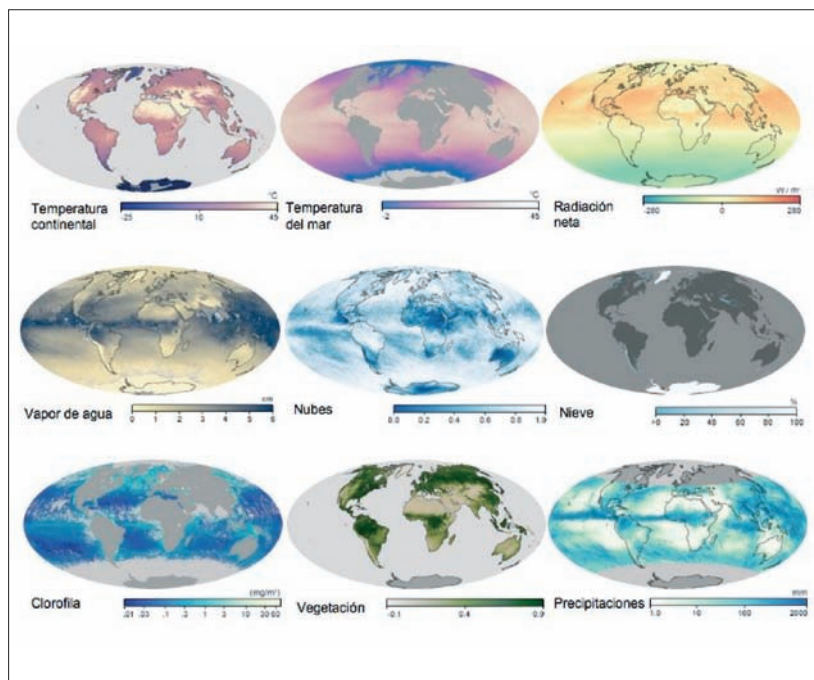
La comparación de mapas como este, tomados en diferentes épocas, permite ver los cambios globales y una mejora substancial en la conservación de uno de los recursos esenciales: nuestra propia superficie, el terreno que pisamos.



■ Mapa global de la superficie de la Tierra, que muestra los diferentes tipos de cobertura.

Las múltiples facetas del planeta Tierra

Desde la distancia, sobre la Tierra dominan blancos y azules, correspondientes a las nubes y a los océanos, y los marrones de los continentes. Por tanto, la existencia de agua en sus diferentes estados (sólido en los casquetes polares, líquido en los mares y gaseoso en la atmósfera) es evidente. Y la presencia de agua sugiere, de manera casi inmediata, la existencia de vida. De hecho, incluso desde satélites en órbita es posible apreciar la in-



■ Mosaico creado a partir de una reconstrucción con datos tomados con diversos instrumentos a bordo de los satélites Terra, Aqua y TRMM, de NASA.

tensa actividad biológica del planeta, como es el caso de las banquisas antárticas o el cambio estacional de la superficie forestal. La variabilidad continua de las nubes indica un cambio permanente, y la existencia de regiones muy diversas.

Un caso concreto de los extremos a los que puede llegar nuestro planeta es su temperatura superficial. La media es de unos +15 °C, con mínimas de -89,4 °C (en Vostok, Antártida) y máximas de +58 °C (en El Azizza, en Libia). Sin embargo, la temperatura media de la Tierra está afectada por el efecto invernadero provocado por los gases de la atmósfera, principalmente el dióxido de carbono, el vapor de agua, el ozono (moléculas de oxígeno con tres átomos, en vez de los dos que tiene el oxígeno que respiramos) y el metano. De no ser así, la temperatura media sería unos 33 grados más baja, alrededor de los -18 °C, y por lo tanto el agua estaría en estado sólido en la mayor parte del planeta.

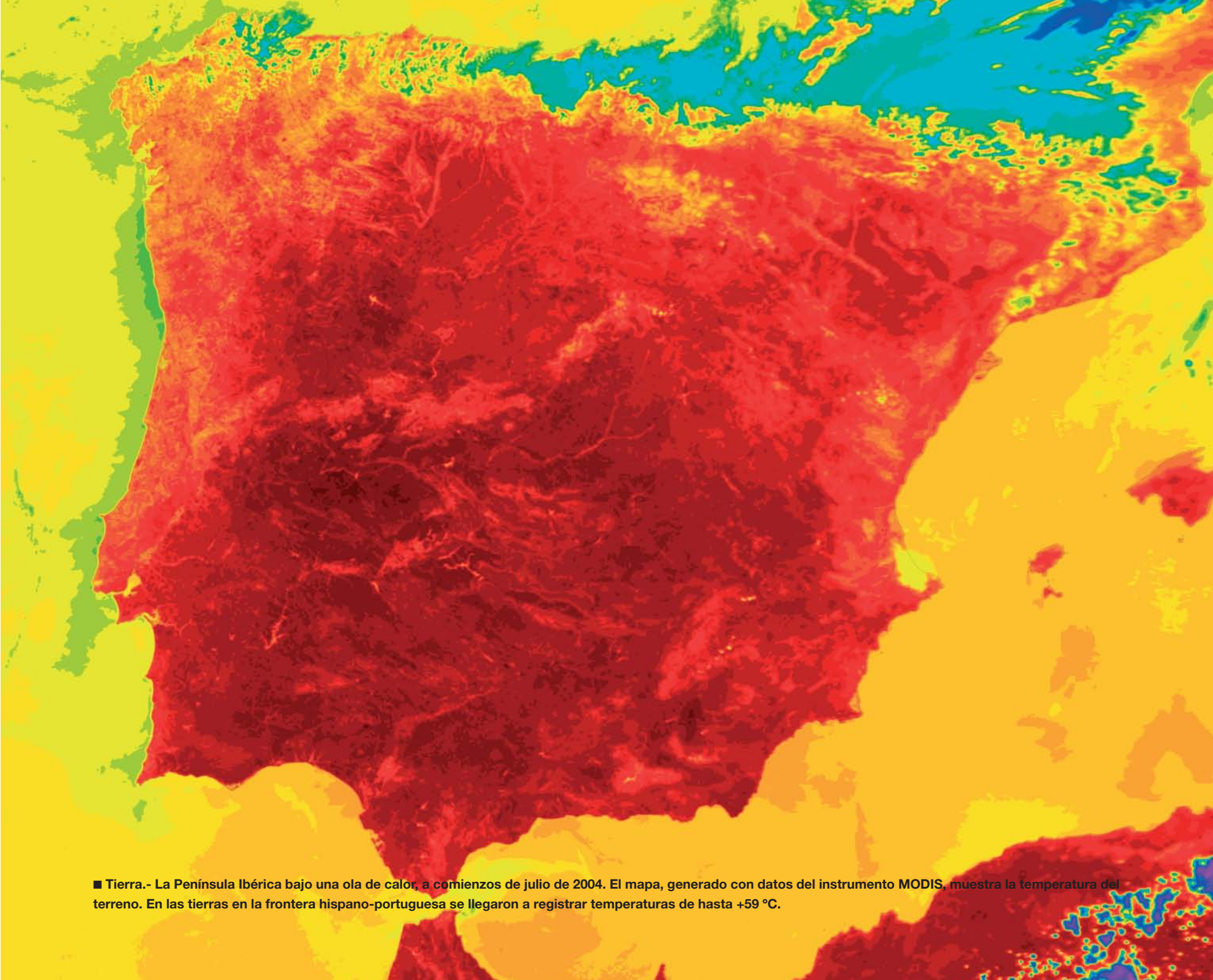
Diferentes técnicas observacionales nos permiten visualizar las propiedades superficiales de nuestro planeta y nos proporcionan una visión complementaria de las mismas. Así, es posible analizar la densidad de nubes y vapor de agua; las temperaturas de mares y continentes, y las implicaciones que tienen sobre la irradiancia neta (el balance de energía recibida y emitida al espacio); las precipitaciones y la cobertura debida a la vegetación y la concentración de clorofila, debida esencialmente al fitoplancton. Estas imágenes nos permiten apreciar de manera vívida los frágiles equilibrios entre diferentes factores y las sutiles relaciones que subyacen entre ellos, no siempre evidentes.

Los cuatro elementos: Tierra, Fuego, Agua y Aire

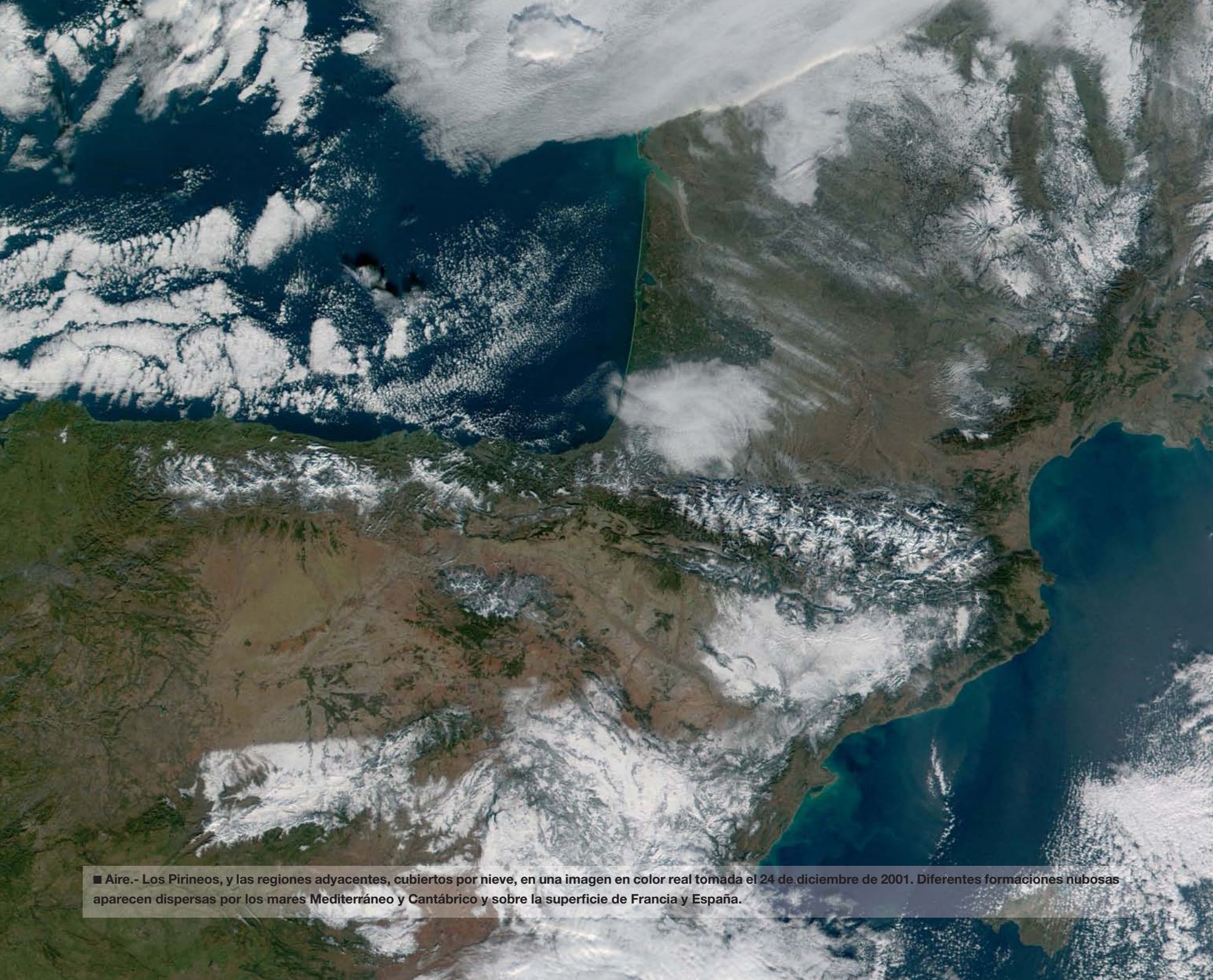
Los cuatro elementos de la filosofía griega, propuestos por Heráclito, Jenófanes, Tales y Anaxímenes (fuego, tierra, agua y aire) y reformulados por Empedocles en el siglo V antes de nuestra era, que según los clásicos eran los componentes esenciales de la naturaleza, siguen permeando el imaginario occidental, a pesar de que nuestro conocimiento íntimo de la materia haya llegado a límites inimaginables incluso para las más brillantes mentes de la Hélade. Sin embargo, existen, y son fundamentales si no para explicar de qué están hechas las cosas, al menos para permitir la vida y la propia civilización sobre nuestro planeta. Las imágenes tomadas desde satélites nos permiten una vigilancia casi continuada que nos capacita para detectar incendios, registrar temperaturas de la superficie o el estado del mar. He aquí unos pocos ejemplos.



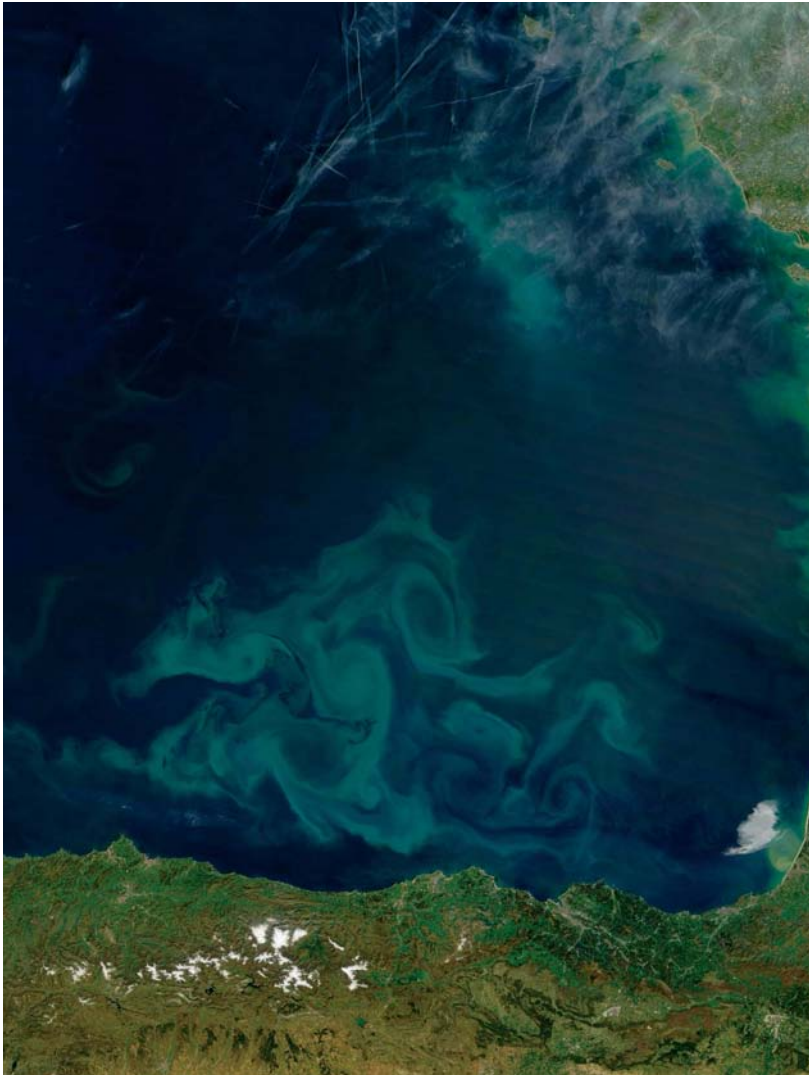
■ Fuego.- Largas columnas de humo, generadas por masivos incendios, que son arrastradas por fuertes vientos desde el Algarbe, en Portugal. Al mismo tiempo, en Marruecos se producen nubes de polvo que se mueven hacia el océano Atlántico.



■ Tierra.- La Península Ibérica bajo una ola de calor, a comienzos de julio de 2004. El mapa, generado con datos del instrumento MODIS, muestra la temperatura del terreno. En las tierras en la frontera hispano-portuguesa se llegaron a registrar temperaturas de hasta +59 °C.



■ Aire.- Los Pirineos, y las regiones adyacentes, cubiertos por nieve, en una imagen en color real tomada el 24 de diciembre de 2001. Diferentes formaciones nubosas aparecen dispersas por los mares Mediterráneo y Cantábrico y sobre la superficie de Francia y España.

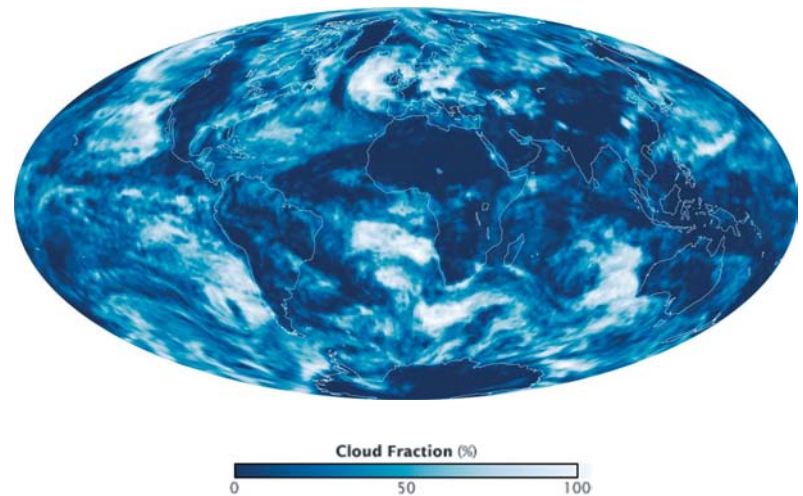


■ **Agua.-** Grandes agrupaciones de fitoplancton, que destacan en el mar Cantábrico por sus intensos colores azules y verdes. En ocasiones, debido a condiciones muy específicas, se puede producir una generación masiva de este tipo de organismos uni- y multicelulares que poseen funciones fotosintéticas y obtienen su energía de la luz solar reprocesando materia inorgánica aportada por corrientes marinas.

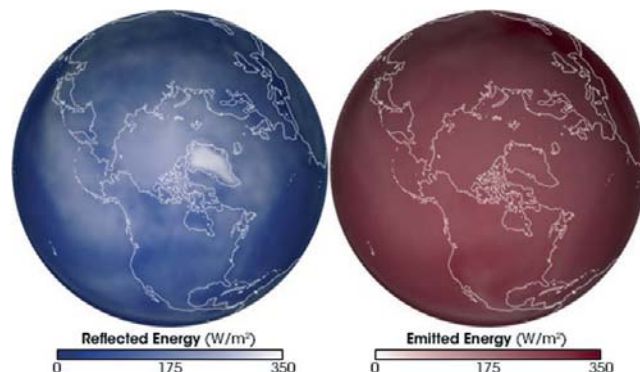
Todas las fotografías fueron tomadas por el instrumento MODIS, perteneciente al satélite Aqua. Créditos: J. Descloitres, MODIS Rapid Response Team, NASA/GSFC.

Las nubes y el balance térmico del planeta

La capa de nubes presente en la atmósfera de nuestro planeta tiene importancia primordial por varias razones. No solo son la fuente del agua que llega al interior de los continentes; también son un factor determinante en la fracción de la energía solar que la Tierra absorbe o refleja, y de la cantidad de energía que radia desde su superficie. Representa, por tanto, no solo un escudo que en cierta medida nos protege del Sol, sino también una capa que conserva el calor terrestre. Es una dicotomía que es el resultado del tipo de nube, su altura (preferentemente bajas sobre los océanos y altas en tierra firme), o del momento de su formación, entre otros factores. Por tanto, es un actor esencial para los modelos climáticos.



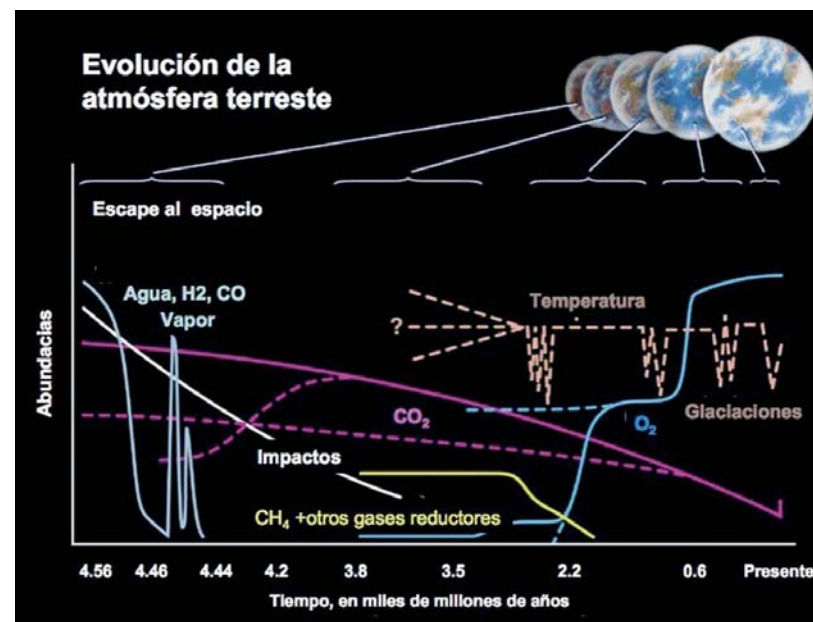
■ Imagen resultado de un mosaico tomado el 27 de diciembre del 2008 con el sensor CERES de los satélites Aqua y Terra, ambos de la NASA. La intensidad de tonos azules indica la fracción cubierta por nubes.



■ El panel de la izquierda (ilustrado con tonalidades azules) muestra la energía solar reflejada, que corresponde a longitudes de onda azules o más energéticas. La emisión térmica de la superficie, que se produce preferentemente en el infrarrojo (no visible para el ojo humano), se muestra en el panel de la derecha (en colores burdeos). Los polos juegan un papel esencial en el equilibrio térmico del planeta, dado que las áreas de mayor reflectividad son aquellas cubiertas por hielo o nubes. Son también las que tienen menos emisividad. Créditos: NASA, Robert Simmon y Reto Stöckli, basado en datos del instrumento CERES.

La evolución de la atmósfera terrestre

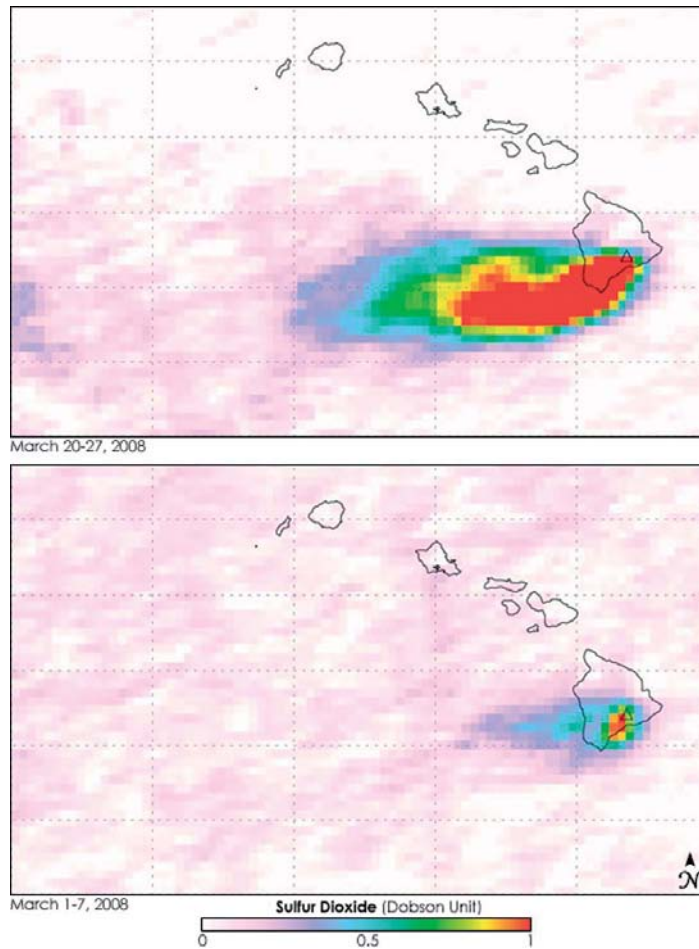
A pesar de los cambios estacionales, y de las grandes diferencias, desde el punto de vista del ser humano, que se pueden apreciar en la climatología de distintas regiones de la Tierra, nuestro planeta es sorprendentemente estable y benigno. Nada que ver con las durísimas condiciones de Venus, con altísimas presiones y temperaturas. O con Marte, en donde se han detectado tormentas de polvo de carácter planetario. Pero la atmósfera terrestre no ha mostrado siempre las mismas condiciones. Existe un registro muy amplio de evidencias que muestra la existencia de periodos fríos o glaciaciones alternados con intervalos más cálidos. Estas variaciones podrían estar relacionadas con cambios en la órbita y la orientación del eje de rotación del planeta en los denominados ciclos de Milankovic, que duran unos 100 000 años. Pero la misma composición de la atmósfera ha evolucionado, influida de manera determinante por la presencia de actividad biológica, que apareció al menos hace 3600 millones de años, a tenor de la antigüedad de estromatolitos, fósiles formados por algas cianofíceas y cianobacterias, encontrados en el Cratón de Pilbara, en el noroeste de Australia.



■ La proporción de los diferentes gases de la atmósfera terrestre ha cambiado con el tiempo. El agua ha desaparecido en buena medida, así como el metano y gran parte del dióxido de carbono. El oxígeno, junto con el nitrógeno, se ha convertido en dominante, esencialmente debido a la acción de plantas fotosintéticas. Basado en D. Des Marais y K. J. Zahnle.

Observando al observador: volcanes y telescopios en Hawaii

Una de las mayores concentraciones de telescopios se localiza en la gran isla de Hawaii, en el observatorio astronómico de Mauna Kea. Sobre la cima de un gigantesco volcán se encuentran los Keck, de 10 metros cada uno, Subaru y Gemini, con espejos primarios de una pieza y diámetro superior a los 8 metros, y varios telescopios míticos de clase cuatro metros (IRTF, UKIRT, CFHT), además de otra instrumentación astronómica como las antenas del CSO (10,4 metros), JCMT (15 metros) o SMA (8x6 metros), que operan en el sub-milimétrico. En radio se encuentra el VLBA, con una base de 25 metros. Esta moderna batería de instrumentación astronómica ha contribuido de manera crucial al conocimiento que tenemos del Universo en el que estamos inmersos. Es, en verdad, uno de los hogares de los observadores.



■ **Concentración de dióxido de azufre pocos días después de la erupción del volcán Kilauea el 19 de marzo del 2008. Además de ser un peligro directo para la salud de las personas que lo inhalan, el dióxido de azufre reacciona con el agua de la atmósfera y crea aerosoles que pueden permanecer suspendidos en la estratosfera durante meses después de una erupción volcánica, reflejando parcialmente la luz solar y produciendo un enfriado relativo del planeta. Créditos: EOS/Aura/OMI.**

Sin embargo, no es habitual que el observador se convierta en el objetivo, en la pieza de caza. Esto es lo que ocurrió el 17 de mayo del 2008, cuando la tripulación a bordo de la Estación Espacial Internacional (ISS) capturó una imagen de la isla y de sus inmensos volcanes: el Mauna Kea y el Mauna Loa (el volcán en escudo más grande de nuestro mundo). En la imagen se han etiquetado las plumas o flujos piroclásticos que provienen del volcán Kilauea, el más activo de entre los de esta clase.

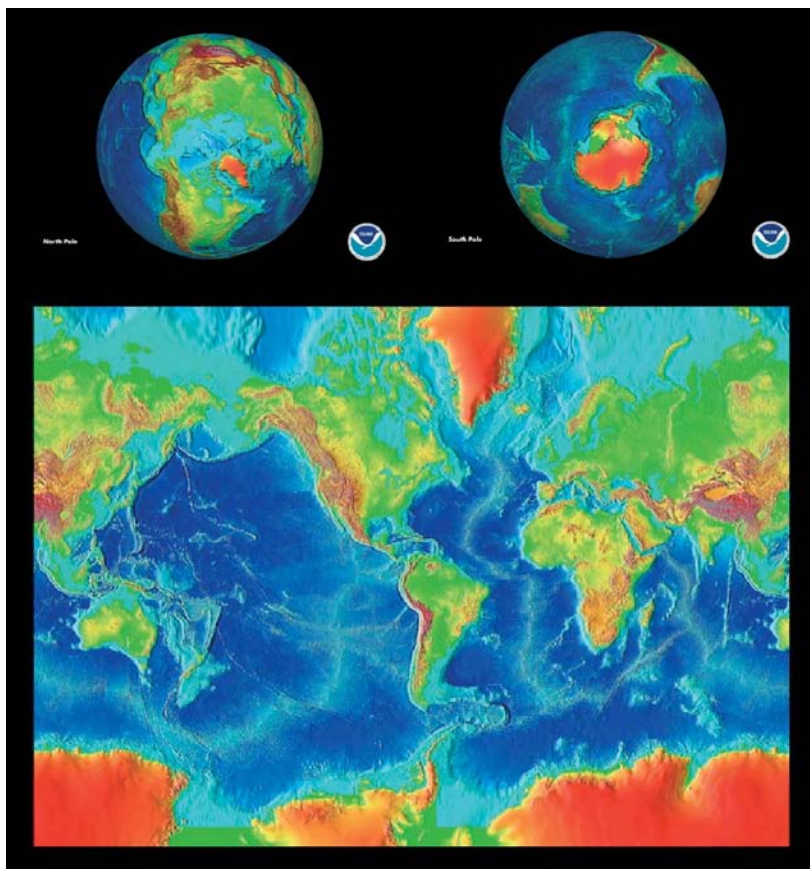


■ **Hawaii desde la Estación Espacial Internacional. Créditos: ISS/Image Science & Analysis Laboratory, Johnson Space Center.**

Nuestro planeta en tres dimensiones

La instrumentación espacial nos permite disponer de una visión mucho más detallada de nuestro planeta, revelándonos lugares y estructuras insospechadas desde la superficie. Por supuesto, también nos permite adentrarnos en las profundidades de mares y océanos, proporcionándonos un mapa en relieve completo de la verdadera superficie de la Tierra, que va desde la fura más angosta en la Fosa de las Marianas (con una profundidad máxima

probada de 11 022 metros), cerca de las homónimas islas y de la de Guam, hasta las alturas más elevadas, en el Everest (que corona a 8848 metros). Por tanto, el desnivel, de algo menos de 20 kilómetros, aunque pudiera parecer impresionante, no es más que una fracción minúscula del diámetro del planeta, estimado en 12 756,28 kilómetros. Esto es, menos de un 0,2%.

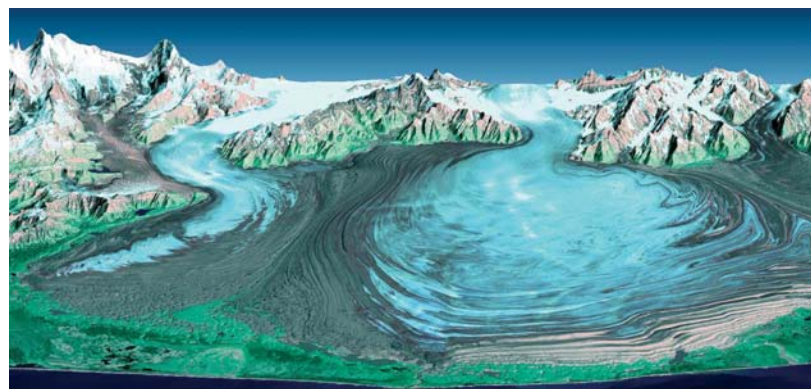


■ La superficie de la Tierra, en donde la altura está codificada con los distintos colores: azul para los fondos oceánicos y verdes, amarillos y rojos para los continentes. La profundidad máxima, en las fosas marinas, es de unos 11 000 metros bajo el nivel del mar (azul más intenso), mientras que los rojos más extremos denotan alturas de 5000 metros sobre el nivel del mar. La diferencia máxima de altura en nuestro planeta es menor de 20 kilómetros. Créditos: NOAA/NGDC.

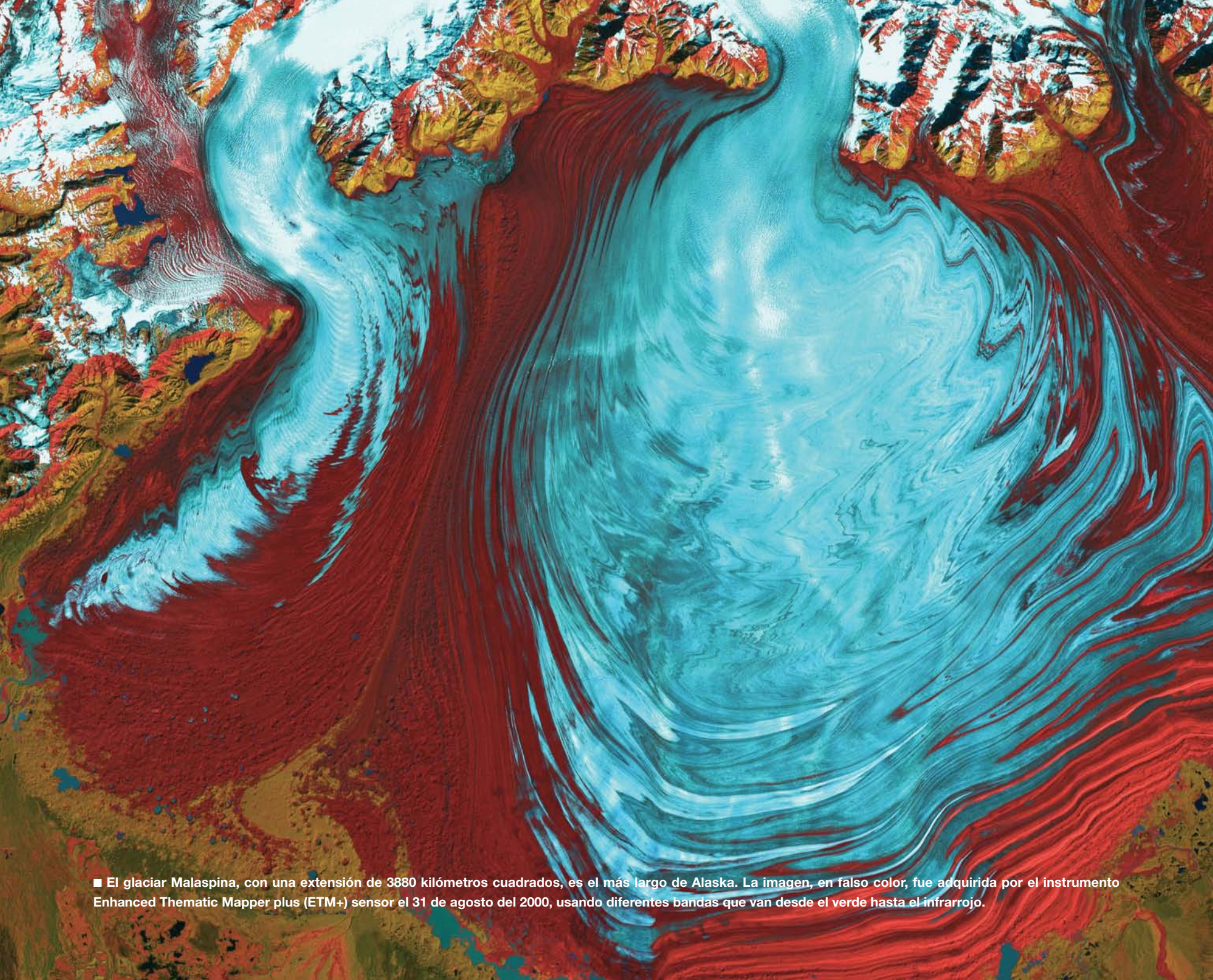
En realidad, si contemplásemos la Tierra desde una distancia prudencial y si no tuviera atmósfera ni océanos, no seríamos capaces de distinguir en su limbo ninguna estructura orográfica, ninguna deformación de la cuasi circunferencia de su disco (recordemos que nuestro planeta es un geoide, con una forma que recuerda a una pera).

En la actualidad, la combinación de fotografías desde satélites, tomadas en diferentes bandas (incluyendo el infrarrojo, radiación electromagnética que no detecta el ojo pero que está relacionada con la temperatura del cuerpo que la emite), con los perfiles altimétricos nos permite reconstruir la verdadera superficie de la Tierra, incluyendo los fondos marinos (mediante el uso de radares basados generalmente en microondas y el cambio que produce la gravedad local en su longitud de onda).

Así, numerosas estructuras que desde el espacio apenas resaltarían sobre las inmediaciones, cobran sus verdaderas formas, y sus datos, verdaderas imágenes tridimensionales, muestran detalles y volúmenes desde cualquier ángulo, permitiéndonos una apreciación fidedigna de la verdadera naturaleza del elemento orográfico, sea este una imponente montaña, una depresión o un glaciar.



■ El glaciar Malaspina, en el centro, según sale del encañonamiento que sufre entre las montañas para expandirse en la llanura próxima al océano. Le acompañan en ambos extremos el glaciar Agassiz (izquierda) y el Seward (derecha). La perspectiva ha sido generada a partir de datos tomados con el satélite Landsat en el infrarrojo y el óptico, y un modelo de elevación obtenido con el Shuttle Radar Tomography Misión (SRTM), que voló a bordo del Endeavour en febrero del 2000. Créditos: NASA/JPL/NIMA.



■ El glaciar Malaspina, con una extensión de 3880 kilómetros cuadrados, es el más largo de Alaska. La imagen, en falso color, fue adquirida por el instrumento Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+) sensor el 31 de agosto del 2000, usando diferentes bandas que van desde el verde hasta el infrarrojo.



■ El archiconocido Monte Ararat, un volcán que se encuentra en la actualidad inactivo, aunque existen evidencias que indican que hace unos pocos miles de años se produjo una erupción. En la imagen se aprecia el desfiladero de Ahora, al norte del pico principal, que desciende abruptamente unos 1800 metros desde la cumbre. La fotografía fue tomada el 18 de marzo del 2001 por la misión STS102 del Shuttle. Créditos: Earth Sciences and Image Analysis Laboratory, Johnson Space Center.



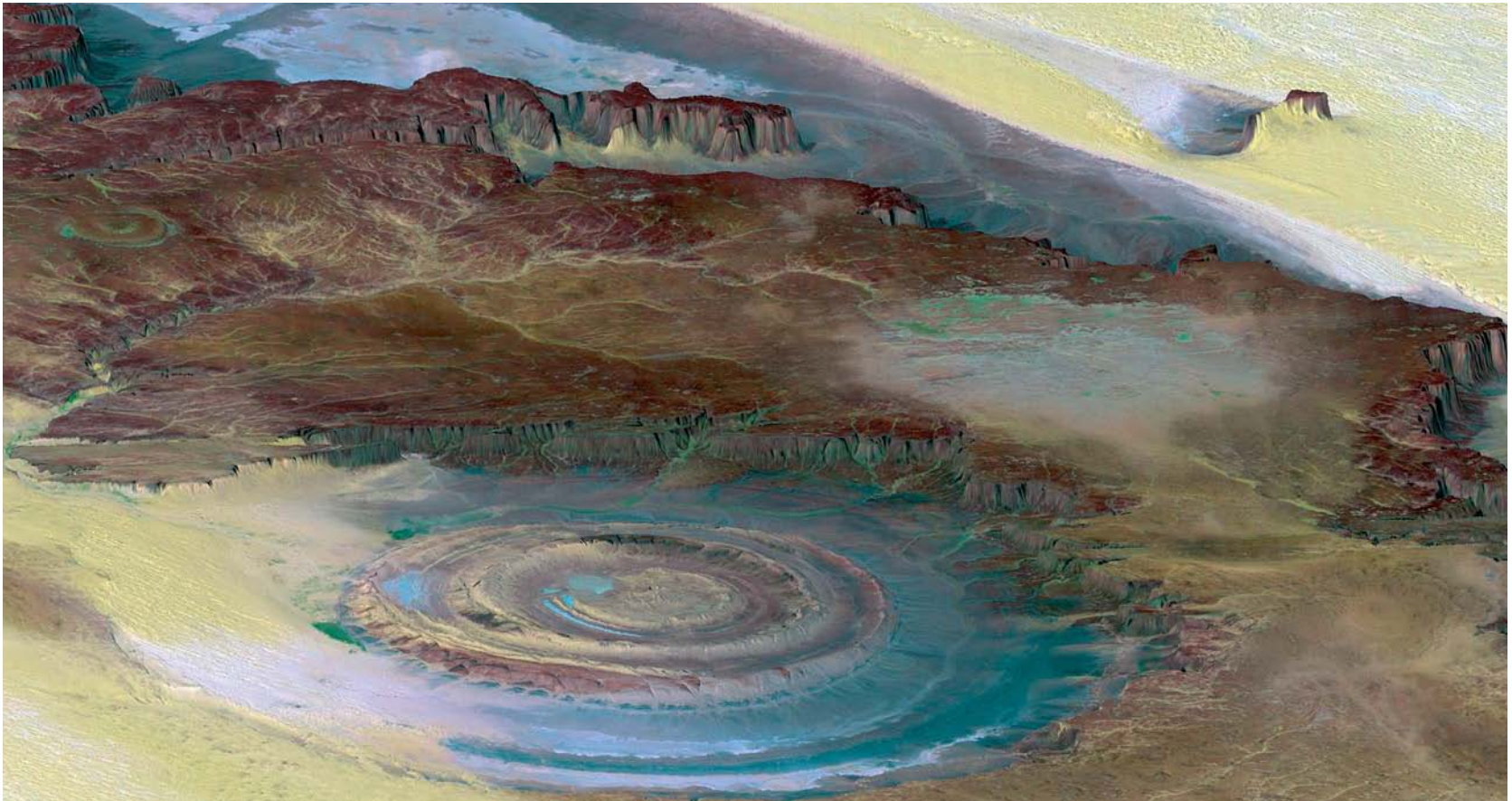
■ Una reconstrucción en tres dimensiones del monte Ararat, en Turquía, que alcanza una cota máxima de 5165 metros. Fue generada a partir de altimetría obtenida por el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) y una imagen del Landsat. Para dar máximo realce, ciertas características han sido ligeramente retocadas por el procesado de la misma (perfil de altura y colores verdes a partir de datos infrarrojos para resaltar la vegetación). Créditos: NASA/JPL/NIMA.



■ Otra reconstrucción tridimensional del Monte Ararat, a partir de datos adquiridos con el Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER).



■ La Estructura de Richat, de unos 50 kilómetros de diámetro, localizada en Mauritania, en el desierto del Sahara, con su particular forma. Aunque la imagen sugiere que se trata de un cráter de impacto, semejante a los visibles sobre la superficie de la Luna, en realidad se trata de un anticlinal circular, una deformación de los estratos de roca sedimentaria expuestos debido a la erosión de la zona. La imagen fue tomada por el Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a bordo del satélite Terra. Créditos: NASA/GSFC/MITI/ERSDAC/JAROS y el equipo científico de ASTER.



■ La Estructura de Richat, en una composición en tridimensional, obtenida con una imagen Landsat y datos del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). La escala vertical está exagerada en un factor seis, para destacar las estructuras. El panorama comprende un área de 68 por 112 kilómetros, y la altura real de la meseta localizada detrás del anticlinal es de 285 metros. Los colores también han sido realzados para diferenciar las rocas (marrones), la arena (amarillo y blanco), la vegetación en los canales de drenaje (verde) y los depósitos salinos (azules blanquecinos). Créditos: NASA/JPL/NIMA.

Caos y creación en los desastres naturales

Las fuerzas de la naturaleza se desatan de manera generalmente inesperada, creando caos y destrucción. Sin embargo, los medios de observación, incluyendo los satélites artificiales en órbita, nos ayudan en las tareas de prevención y de ayuda. Dos ejemplos en los últimos años: el *tsunami* en el Índico del 2004 y el reciente terremoto en China en el 2008.

Este último evento, que asoló el centro de China, dejando decenas de miles de muertos y millones de afectados, ha tenido también consecuencias para la orografía de la región. Imágenes adquiridas con el satélite Terra muestran los impresionantes deslizamientos de terrenos ocasionados por el terremoto. En algunos casos ha sido necesario dinamitar estos diques naturales para evitar inundaciones.

Hace varios años asistíamos atónitos a otro desastre natural, prácticamente en directo por efecto de los numerosos documentos gráficos recogidos por turistas en las zonas afectadas. Nos referimos al maremoto de diciembre de 2004, que sesgó numerosas vidas, siendo uno de los peores desastres naturales de los últimos 100 años. También afectó de manera considerable a los ecosistemas de las costas. Un ejemplo lo proporciona el impacto sobre la isla de Phuket, donde numerosas zonas fueron inundadas. Desde el espacio también se pudieron distinguir las gigantescas olas rompiendo sobre la costa india.

De hecho, los efectos del maremoto se sintieron en todo el planeta, en diferente medida. Desde el epicentro en el mar de Andamán, junto al Golfo de Bengala, entre la India, Tailandia, Indonesia y Malasia, hasta el Mar del Norte en Europa, el *tsunami* se trasladó como una onda a lo largo y ancho de mares y océanos.



■ Comparación entre los efectos dejados por el terremoto de Sichuan, China, que tuvo lugar el 12 de mayo de 2008, con una imagen tomada en el mismo lugar varios años antes. Créditos: NASA (GSFC/METI/ERSDAC/JAROS/U.S./Japan ASTER Science Team) y Jesse Allen.

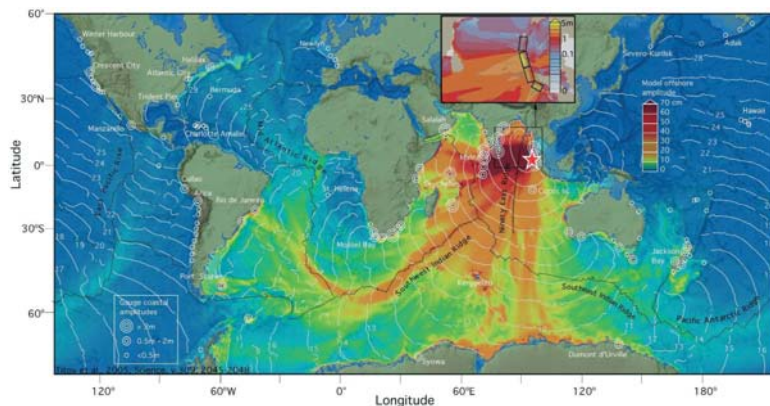
A raíz de este desastre, diferentes organismos y países han puesto en marcha una red de alerta temprana. Un ejemplo de ello es el NOAA Center for Tsunami Research, en EEUU, con su sistema de boyas en alta mar; o la monitorización del avance y evolución de un *tsunami* desde satélites, como es el caso del Laboratory for Satellite Altimetry, igualmente del NOAA.



■ Parte de la costa de la isla tailandesa de Phuket. La zona, de unos 27 kilómetros, fue anegada durante el desastre del *tsunami* del 26 de diciembre del 2004, como muestra la imagen central. La imagen de la izquierda muestra el mismo perfil fotografiado dos años antes con el mismo instrumento, ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), que se encuentra en el satélite Terra. La imagen de la derecha proporciona información en altura, y destaca en rojo el área localizada a una altura menor de 10 metros sobre el nivel del mar (datos de Shuttle Radar Topography Misión o SRTM).



■ Secuencia de imágenes que muestran cómo las olas generadas por el tsunami rompen contra la costa de la India. Créditos: NASA/Terra/MISR.



■ El efecto global del tsunami del 26 de diciembre del 2004. El color rojo indica la altura estimada del mismo. Créditos: NOAA / PMEL / Center for Tsunami Research.

Groenlandia, el inlandsis y el océano Ártico

Groenlandia. Isla fascinante, inmensa, mítica. Sin embargo, en peligro. En un solo año, el hielo ártico ha descendido en un 15%. Una superficie de 750 000 km, una vez y media la total de España.

Para quien ha tenido la fortuna de verlo, la visión del inlandsis, el casquete de hielo que cubre la mayor parte de Groenlandia, no es fácil de olvidar. Quienes conocen bien la región dicen que los glaciares retroceden a gran velocidad, y que las temperaturas medias han subido apreciablemente. El verano (la duración de la estación con temperaturas agradables) se ha alargado también de manera ostensible. Mientras tanto, discutimos si el efecto es debido a la naturaleza (ciclos solares, movimientos seculares de la órbita de la Tierra, o efectos aún por descubrir) o a la intervención del hombre. La mayoría de los expertos se inclinan por esta última posibilidad.

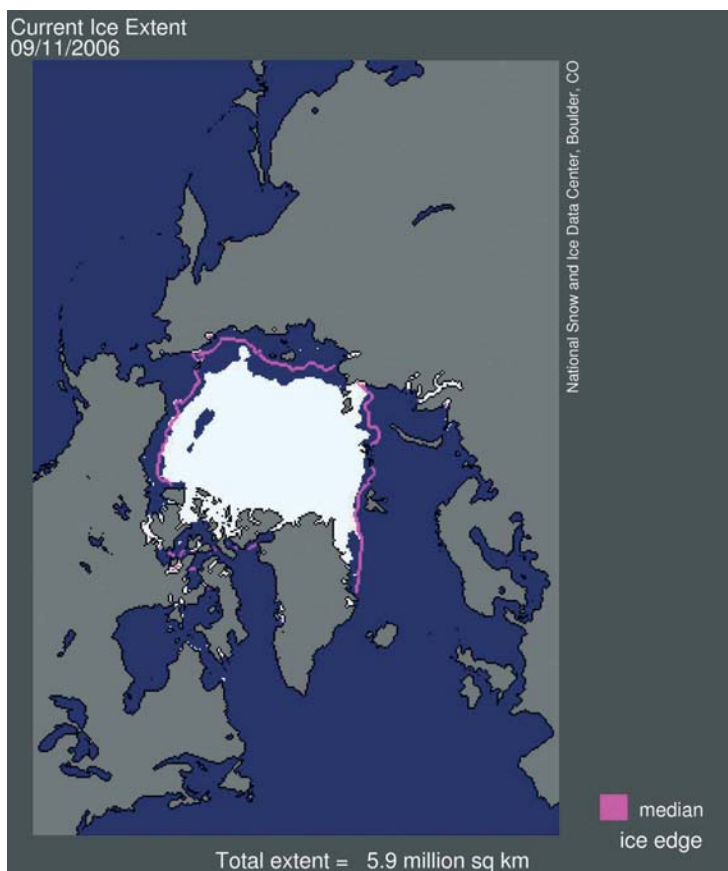


■ El glaciar del Qooroq, visto desde la bahía. La altura del frente del glaciar es de unos 70-100 metros, mientras que la anchura corresponde a unos 1500 metros.

Otro estudio diferente de la Agencia Espacial Americana NASA afirma que la reducción de la capa de hielo es solo de un 14%, frente al referido con anterioridad 15%. ¿Se debería decir que 25 000 km se han salvado? Noticias similares se llevan publicando desde al menos el 2003. La experiencia de montañeros y viajeros diversos dice que hay numerosas evidencias que muestran el retroceso de los glaciares por doquier: en Suiza,

en Argentina, en Escandinavia. Los viejos libros sobre la exploración ártica dejaban claro la dureza climatológica en el siglo XIX, durante la búsqueda del pasaje del Noroeste, la unión al norte de Canadá del Atlántico y del Pacífico. Más de un buque se quedó varado incluso durante años debido a la gran cantidad de hielo. Ahora se especula con la posibilidad de que sea navegable de manera comercial en pocos años.

El hielo ártico no es solo importante por su belleza. La región es clave para regular el clima de manera global. Nos estamos jugando nuestro futuro, y no solo a medio o largo plazo.



■ Zona cubierta por hielo en el hemisferio Norte. Créditos: National Snow and Ice Data Center, EEUU.



■ El islandis groenlandés, en una vista aérea.



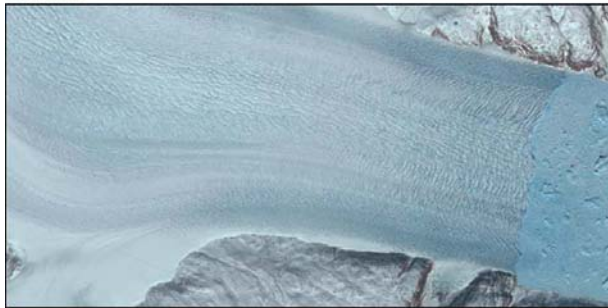
■ El Ártico junto a Siberia y Norteamérica, en una perspectiva proporcionada por el satélite Aqua y el instrumento AMSR-E. Créditos: NASA/Goddard Space Flight Center.



June 19, 2005



July 7, 2003

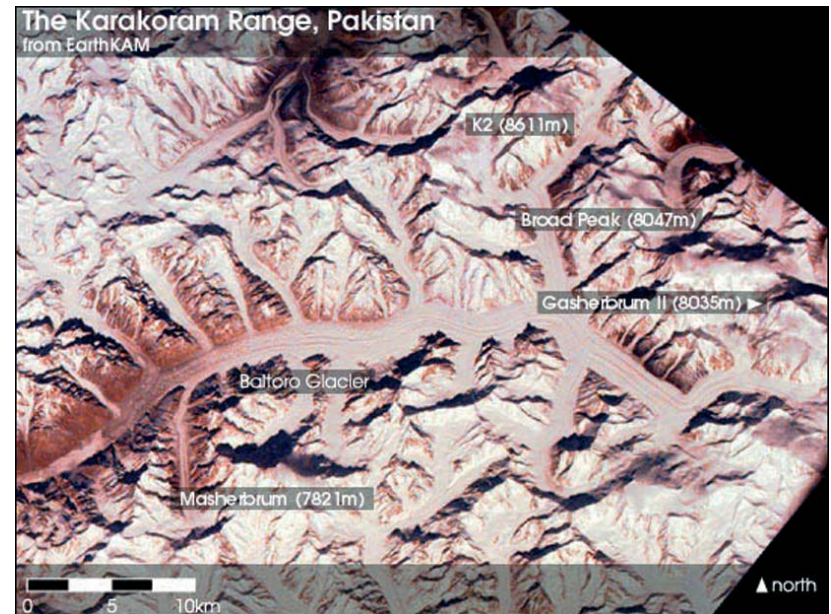


May 12, 2001

■ El glaciar de Helheim, en el este de Groenlandia. Las imágenes, tomadas con el instrumento Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), en junio del 2005 (arriba), julio del 2003 (en medio) y mayo del 2001 (abajo), muestran claramente que el frontal del río helado está retrocediendo con gran rapidez. Durante los últimos años del siglo XX la posición del frontal fue muy estable. Sin embargo, en los cuatro años que separan las fotografías, el glaciar ha retrocedido hacia el interior unos 7,5 kilómetros. También se ha vuelto más delgado, unos 40 metros.

El glaciar del Baltoro y la cumbre del K2 en Pakistán

En el norte de Pakistán confluyen tres de las más importantes cordilleras de nuestro planeta: el Hindu Kush, el Himalaya y el Karakorum (o Karakoram), separados por el Indo. Este mítico río se alimenta de numerosos tributarios de varios glaciares que provienen de las impresionantes montañas que se alzan casi por doquier. Entre ellos sobresale el glaciar del Baltoro, de unos 60 kilómetros de longitud y uno de los más prolongados fuera de Groenlandia y la Antártida.



■ Imagen del glaciar del Baltoro y de varios «ochomiles» (K2, Broad Peak, Gasherbrum II) localizados en el noroeste de Pakistán, en la cordillera del Karakorum, una cadena montañosa situada cerca de las primeras estribaciones del Himalaya. El K2, segunda cumbre más alta del planeta, destaca por su estructura piramidal y por su clara sombra. Créditos: NASA y programa EarthKAM.

El glaciar es fácilmente distinguishible desde el espacio a distancias próximas, como nos muestra la imagen tomada desde el Shuttle. Es, verdaderamente, un río de hielo que transporta, lentamente, ingentes cantidades de agua y roca. La fotografía también revela muy claramente la presencia de grandes picos, entre los que sobresale el K2, por su extraordinaria altura (el

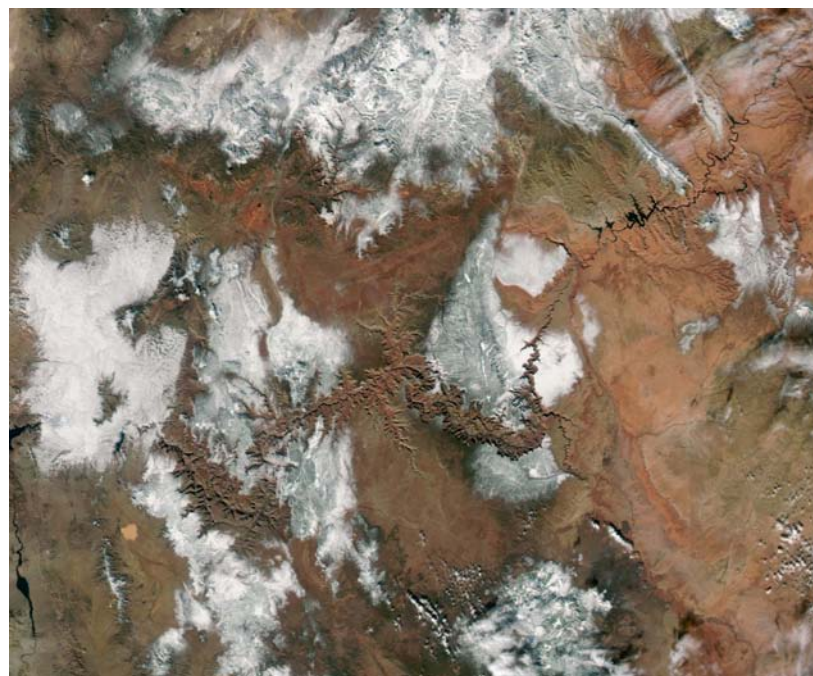
segundo más alto de nuestro planeta, de una simetría piramidal casi perfecta) y el Masherbrum, por su gran masa rocosa, resaltada por la orientación y el juego de las sombras.



■ El K2, visto desde el terrero desde el campamento de Concordia, en la confluencia de los glaciares del Baltoro y Godwin-Austen. Foto de Daniel Cano Ott.

Las cicatrices de la Tierra: el Gran Cañón del Colorado

Desde la distancia, son pocas las estructuras geológicas discernibles sobre la superficie de nuestro planeta. Una de las más impresionantes bien pudiera ser el Gran Cañón del Colorado. Sin embargo, para tener una verdadera perspectiva de su significado, la justa comparación se encuentra fuera de la Tierra. Es Marte, con su increíble Valles Marineris, que pone en su justo lugar al Gran Cañón. En primera instancia, las dimensiones del Gran Cañón se nos antojan fuera de toda medida humana. Con una profundidad de 1,6 kilómetros, una anchura que varía entre los 6,4 y los 29 kilómetros y una longitud de 349 kilómetros, para los afortunados que han podido contemplarlo desde los bordes, o han caminado por las orillas del lecho del río Colorado, probablemente la experiencia ha sido una de las más memorables de sus vidas. Los sedimentos multicolores que han sido excavados por la erosión del río nos permiten ver una historia del terreno, que empezó hace unos 2000 millones de años, pues esa es la edad de los estratos más antiguos.



■ El Gran Cañón del Colorado, que zigzaguea entre llanuras cubiertas de nieve, en una imagen tomada el 23 de noviembre de 2004 por el satélite Aqua y su instrumento MODIS. La resolución espacial es de 250 metros.



■ El inmenso Valles Marineris, en Marte, según una composición de imágenes tomadas por las sondas Viking a mediados de los años 70. Créditos: NASA.

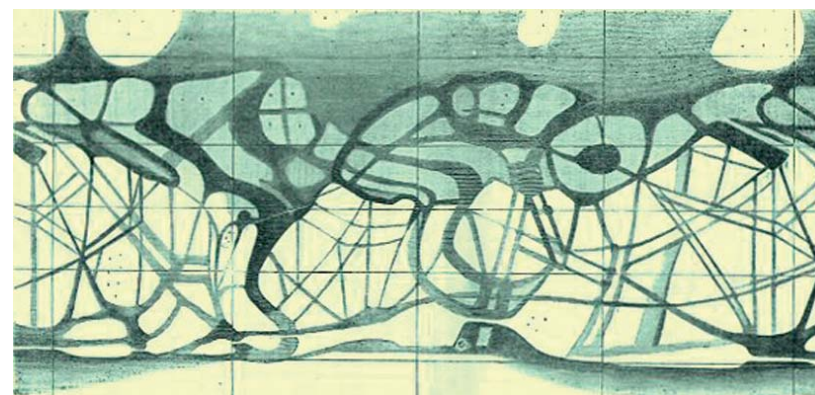
Valles Marineris es, probablemente, una falla tectónica formada durante el enfriamiento del planeta rojo. Sus dimensiones nos dejan atónitos: 4000 kilómetros de longitud, que cubren aproximadamente un quinto del diámetro de Marte. Su profundidad llega hasta los 8 kilómetros en algún punto, y su anchura llega a alcanzar los 200 kilómetros. Una comparación aproximada basta para darnos cuenta de su verdadera magnitud: su superficie es aproximadamente 50 veces mayor que la del Gran Cañón del Colorado, y si comparamos volúmenes el factor se incrementa a unos 300. Extraordinario, sobre todo si tenemos en cuenta que la superficie de la Tierra es unas 3,5 veces la de su hermanastro.

La Gran Muralla China, las Pirámides y los canales de Marte

La Gran Muralla China... la única estructura artificial discernible desde el espacio. O eso se creía. ¿Qué hay de cierto en ello? ¿Desaparece este monumento único cuando nos alejamos unos cuantos cientos de kilómetros por encima de la superficie de nuestro planeta? ¿Es un mito, como los canales de Marte de Schiaparelli?

Giovanni Schiaparelli, astrónomo italiano y gran observador, afirmó en 1877 que había descubierto una estructura de canales (no necesariamente artificiales). Desde entonces, los famosos canales se han desvanecido, al igual que otros mitos marcianos (aun cuando existan intentos de revivirlos de vez en cuando, a pesar de las evidencias).

La Gran Muralla China es un monumento excepcional, de más de dos mil años de antigüedad y miles de kilómetros de longitud. Se afirma sobre él que es la única (o al menos la más relevante) estructura humana que se avista desde el espacio. ¿Es verdadero?



■ Mapa dibujado por Schiaparelli con los famosos e irreales canales marcianos.

Hace unos años (2003), después de las declaraciones del primer astronauta lanzado con un cohete chino en las que aseveraba que esta barrera no se divisaba desde su órbita a baja altura, la Agencia Espacial Europea mostró una imagen tomada con el satélite Proba en la que sí pa-

recía distinguirse, según la nota de prensa de la ESA. Sin embargo, el organismo europeo tuvo que retractarse poco después. Lo que en realidad se veía eran los meandros de un río. De hecho, la Gran Muralla China es demasiado estrecha para poderse distinguir desde, por ejemplo, la Estación Espacial Internacional (ISS), según las declaraciones de Michael López-Alegría. No obstante, con instrumentación adecuada, y con condiciones óptimas, sí se puede vislumbrar, como es el caso de la foto tomada con detectores térmicos, cuando hay una tenue capa de nieve.



■ Imagen tomada con el Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) en el norte de la provincial de Shanxi, en China. La muralla se aprecia a duras penas por efecto del ángulo del Sol y la nieve depositada. Créditos: NASA/GSFC/MITI/ERSDAC/JAROS y U.S./Japan ASTER Science Team.

Sin embargo, hay otros monumentos de la Antigüedad que sí se pueden observar con relativa facilidad. Nos referimos, por supuesto, a las pirámides de Giza, en Egipto. Probablemente haya más monumentos (y por supuesto, numerosas estructuras modernas) que sí se pueden observar desde

una órbita a baja altura. Esto no significa que el ojo humano pueda distinguirlos sin ninguna ayuda.

En cualquier caso, basta contemplar cualquier imagen del lado nocturno para ver el efecto verdadero y global de la actividad humana sobre el planeta. Desde las megalópolis en cualquier continente hasta los campos petrolíferos con la combustión continua de hidrocarburos: la huella de la civilización es bien patente.



■ La famosa toma de la sonda Proba. Créditos: ESA.



■ El valle del Nilo en la zona de El Cairo, y las pirámides de Giza, fácilmente identificables desde la ISS.

La presa de las Tres Gargantas

Si el Egipto faraónico dejó su impronta con sus pirámides y Occidente sus canales interoceánicos, ahora aparece otra marca en la superficie terrestre. En este caso la presa más grande jamás concebida: la de las Tres Gargantas, en el río Yangtze, el más prolongado de Asia, en China.



May 15, 2006



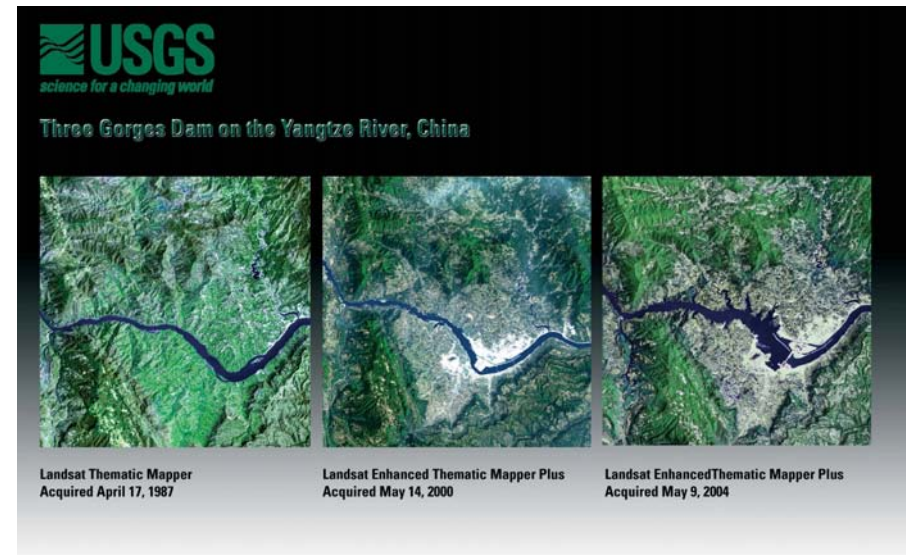
July 17, 2000

■ La cabecera de la presa en dos épocas distintas: en el año 2000 y en el 2006, cuando se completó el muro de hormigón. Créditos: NASA-Jet Propulsion Laboratory-ASTER.

Esta presa, que ya se está rellenando, ha supuesto un cambio substancial para las condiciones del medio circundante. Algunos la señalan como uno de los mayores desastres ecológicos y humanos (ha implicado el desplazamiento de millones de personas que vivían a orillas del río), además de inútil. Otros la

califican de brillante obra de ingeniería, ejemplo de la capacidad de uno de los nuevos gigantes económicos, China. Cuando esté completamente llena de agua (y de residuos industriales, humanos y pesticidas), aproximadamente en el 2012, la altura máxima del agua será de unos 175 metros y cubrirá una longitud de unos 600 kilómetros (aproximadamente la distancia de Barcelona a Madrid). Sea como fuere (ambas posiciones bien pudieran tener razones, en la próxima década los efectos serán evidentes), es una estructura interesante. Dado que la curiosidad está en la naturaleza humana (seguimos siendo esencialmente antropoides), las fotos desde órbita pueden ser iluminadoras. De hecho, existe una gran e interesante colección. Aquí se incluye una pequeña muestra para resaltar la evolución del efecto sobre el valle del río Yangtze (comparación entre los años desde 1997 hasta 2006).

La visión desde el espacio, aunque curiosa, no parece destacar sobre otras estructuras artificiales, especialmente si nos circunscribimos al muro de hormigón principal (de 190 metros de altura y completado en el año 2006) y a las estructuras aledañas. En cualquier caso, una huella más de la presencia del ser humano y de su actividad sobre el planeta.



■ Imágenes del United States Geological Survey, con el efecto sobre el valle del Yangtze entre 1987 y el 2004.

La estructura viva más fácilmente distinguible desde el espacio

Sorprende tras sorpresa. Después de aprender que la Gran Muralla China no es la estructura artificial más fácilmente distinguible desde el espacio, buscamos la contrapartida biológica y...

Se dice que la mayor estructura viva es la Gran Barrera de Corales. Sin embargo, parece que no es completamente cierto. Como tantas otras cuestiones, depende del enunciado de la pregunta el tipo de contestación.



■ La Gran Barrera de Coral, frente a la gran masa continental de Australia, vista por el Multi-angle Imaging Spectroradiometer, en el satélite Terra.

Créditos: NASA/GSFC/LaRC/JPL, MISR Team.

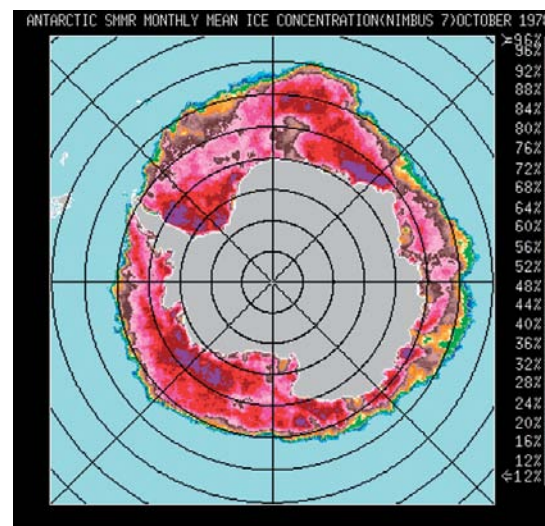
La Gran Barrera de Coral (Great Barrier Reef) está compuesta por un inmenso conjunto de colonias que cubren una extensión de unos 2000 kilómetros de longitud hacia el noreste australiano. En ocasiones se afirma que es el animal más grande vivo (recordemos que los corales lo son). En cualquier caso, según dicen los expertos, es uno de los sistemas más complejos y variados que existen. También de los más delicados. La foto adjunta

muestra esta estructura única vista desde una órbita cercana, por el satélite Terra. Los detalles corresponden a un tamaño de un kilómetro, aproximadamente, pero en la imagen original, en alta resolución, se pueden apreciar estructuras de hasta 250 metros.

Sin embargo, este conjunto de arrecifes coralinos no es la estructura viva más grande que se puede divisar desde el espacio... la respuesta está en una de las regiones, en apariencia, más desoladas de nuestro planeta. Tal vez incluso sea visible desde nuestro satélite, la Luna.

Sí, es el continente antártico. Más concretamente, los mares antárticos y el ecosistema que se mantiene debajo de sus hielos estacionales. Bajo ellos se forma una verdadera pradera de la que depende una cantidad ingente de krill (crustáceos parecidos a los camarones) y de él, una extraordinaria biodiversidad que diríamos que corresponde a tiempos pasados. Ballenas y otros cetáceos dependen también del krill, bien directamente o por animales que se alimentan de esos crustáceos.

Basta con romper la banquisa antártica para ver que el hielo no tiene coloración uniforme. Su parte oculta, sumergida, presenta matices marrones y verdes: la verdadera pradera antártica.



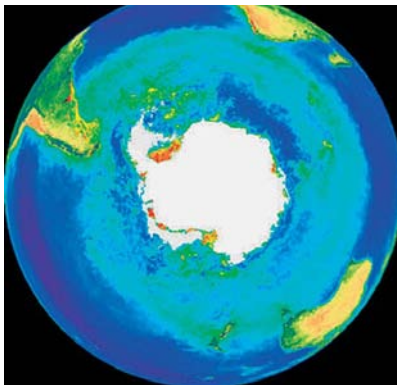
■ La banquisa antártica, cuya superficie cambia de manera estacional.

Créditos: National Snow and Ice Data Center.

Sí, la vida es variada bajo la banquisa, y sobre los fondos que se enriquecen con el material que sobre él se deposita. Una gran cantidad de fauna vive sobre el lecho marino en lo que se puede decir que es uno de los ecosistemas de mayor biomasa y también diversidad. Con esta riqueza biológica (y minera), no es de extrañar que se haya iniciado una carrera para controlar los recursos del continente blanco. Son decenas de millones de kilómetros cuadrados que albergan una sorprendente estructura viva, con cambios muy importantes dependientes de la estación. Y, como decíamos al principio, discernible a una gran distancia desde el espacio.



■ La banquisa rota por el paso de un barco, que nos muestra la parte sumergida (cortesía R. Scharek).



■ Distribución de la clorofila (del fitoplancton: amarillos y rojos implican mayores concentraciones) en los alrededores de la Antártida, obtenida con el satélite de NASA SeaWiFS.

La estructura artificial más fácilmente detectable desde el espacio

¿Cuál es la estructura humana más fácilmente distinguible desde el espacio? ¿Qué llama la atención, qué destaca sobre blancos, azules y marrones, sobre el mármol azulado de nuestro planeta? Si una hipotética nave alienígena se acercase a la Tierra, ¿qué vislumbraría primero?, ¿qué estructura humana destacaría sobre el resto?

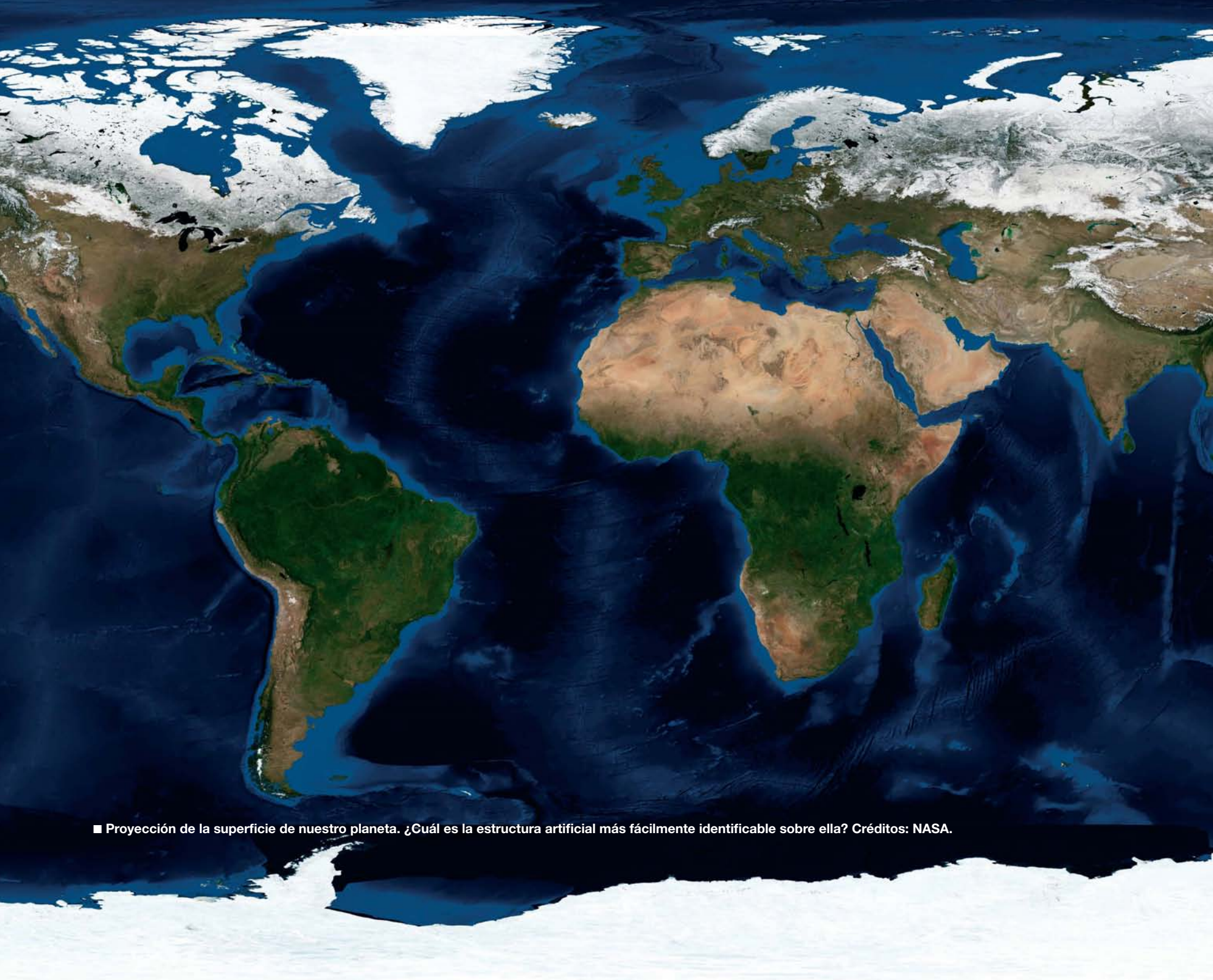
Según nos aproximásemos a nuestro planeta, según la resolución espacial mejora y podemos apreciar más detalles sobre su superficie, se nos revela la presencia de océanos y continentes, de nubes cambiantes, de luces nocturnas. Sin embargo, durante el día, ¿qué veríamos desde más cerca?

La Gran Muralla China se levanta como un ejemplo a la tenacidad humana. O las grandes pirámides del antiguo Egipto (también habría quien vería en estas construcciones un monumento a la miseria y al lado más oscuro del ser humano, levantadas como están sobre los hombros de miles de esclavos y súbditos). Sin embargo...

Hace tiempo, compartiendo mesa con Michael López-Alegría, astronauta de la NASA nacido en Madrid, me sorprendió la respuesta que nos dio. Michael fue comandante de la estación espacial internacional (ISS) durante la misión XIV. Estuvo allí desde septiembre de 2006 hasta abril del año siguiente, durante casi siete meses. Su respuesta fue clara: la estructura artificial que se divisa de manera más fácil desde una órbita baja es... los campos de invernaderos de Almería, en el sudeste español.

En la imagen de Europa adjunta casi diría que se vislumbra. No queda ninguna duda cuando se observa con más detalle la península Ibérica. Los campos se muestran como una mancha blanquecina en la parte inferior, en la costa española.

Son miles de hectáreas (desde 20 000 hasta 70 000, según las fuentes) cubiertas por plástico, donde se producen en invernaderos diversas cosechas de frutas tropicales, pimientos, tomates, calabacines, sandías, melones y otros productos hortofrutícolas, principalmente dedicados al mercado español y europeo. La zona es, desde el punto de vista de la climatología, extremadamente árida, en la que llueve de manera muy escasa. De hecho, cerca de allí se localiza un verdadero desierto (es una de las razones por las cuales el Centro Astronómico hispano-alemán de Calar Alto está situado en las proximidades). La producción depende de acuíferos subterráneos, de difícil sustitución una vez



■ Proyección de la superficie de nuestro planeta. ¿Cuál es la estructura artificial más fácilmente identificable sobre ella? Créditos: NASA.



■ Los campos de invernaderos en Almería. Créditos: NASA/Visible Earth.

que se agotan o se salinizan. El desarrollo de esta zona se ha producido en muy pocos años, principalmente por la conversión de parcelas pequeñas en invernaderos por parte de sus propietarios. La zona es tan fácilmente distinguible debido a que el plástico tiene una alta reflectividad, un albedo alto, que decimos los astrónomos.

Sorprende ver la imagen, comprobar lo rápido que podemos transformar el entorno y dejar una marca tan visible. En buena medida es entristecedor. Es cierto que miles de personas viven de la actividad económica desarrollada en la zona y muchos de los tomates o frutas que millones de europeos comen fuera de temporada provienen de estos invernaderos. Sin embargo, un desarrollo así no parece sostenible, especialmente en un lugar donde el bien más precioso, el agua, escasea de manera tan obvia. Y será bastante peor en el futuro, a tenor de las predicciones sobre los efectos del cambio climático sobre España.

¿Cuándo y dónde ocurren las auroras?

¿Cuándo ocurren las auroras polares? ¿Cuándo es posible observar este fenómeno? Puesto que las partículas del viento solar llegan continuamente a la Tierra, siempre existen auroras tanto durante el día como por la noche, aunque obviamente durante el día la luz del Sol es muchísimo más intensa y no las podemos ver. Los siguientes factores favorecen las posibilidades de observar una aurora:



■ Europa, el Mediterráneo, Oriente Próximo y Siberia, cubiertos por la nieve. Sin embargo, el punto blanco en el sudeste español corresponde a otro sustrato altamente reflectante: el plástico de los invernaderos de Almería. Créditos: NASA/Visible Earth.

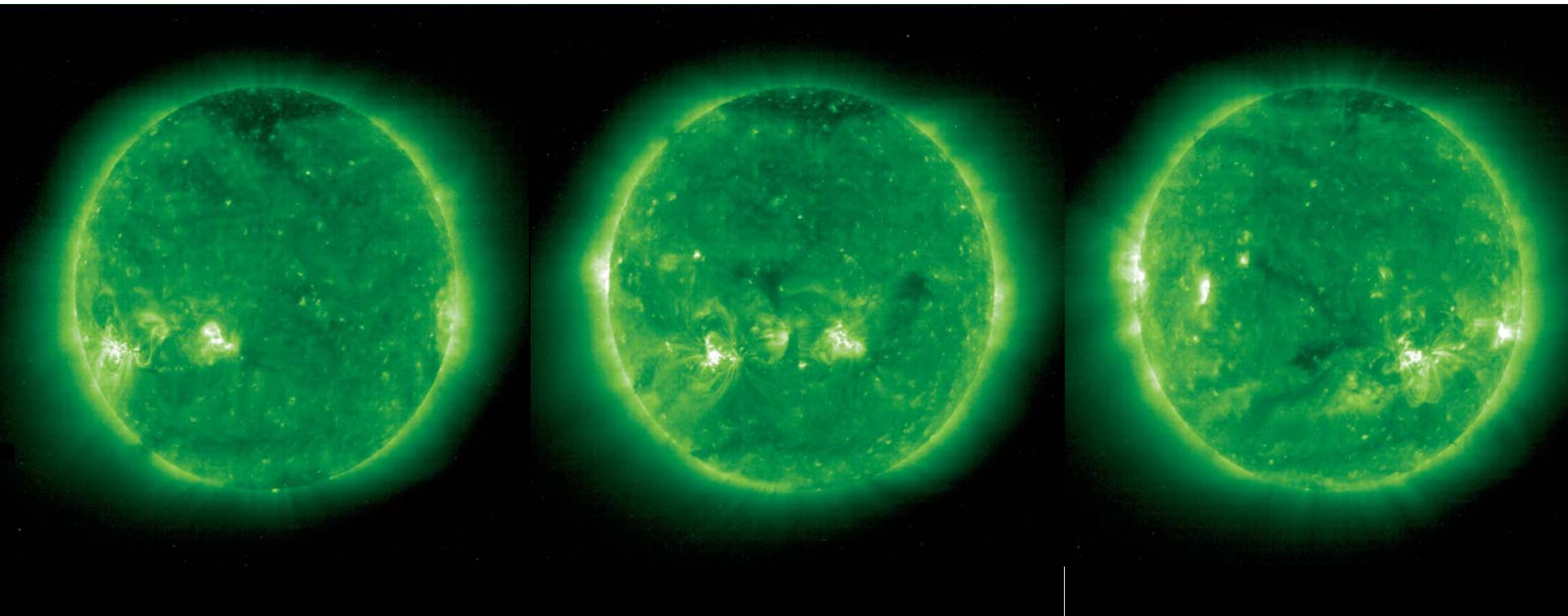


■ La península Ibérica, con nieve en la cadena montañosa de los Pirineos, que separa España de Francia. Créditos: NASA/Visible Earth.

- Hora del día: puesto que la intensidad del brillo de una aurora es muy baja, solo puede observarse por la noche. De hecho, las auroras más activas y brillantes ocurren normalmente en torno a la medianoche, de modo que las mejores horas para observarlas están entre las 23:00 y las 2:00.

- Estación: a las latitudes donde las auroras son más comunes en verano hay luz del Sol prácticamente durante todo el día. El otoño y la primavera son periodos muy adecuados, debido a la cantidad de horas nocturnas disponibles y a las temperaturas, que no son demasiado bajas. En la mayoría de las regiones polares el tiempo tiende a ser bueno y claro en la mitad del invierno, de modo que también se pueden realizar observaciones durante esta época del año.

- El ciclo de actividad solar: cada 11 años, el Sol tiene un máximo de actividad magnética que se aprecia en imágenes tomadas en luz visible en un máximo en el número de manchas, y en imágenes en rayos X en una actividad máxima de la corona. Como regla general, cuanto mayor es la actividad solar más frecuentes son las auroras y es posible que el rango de latitudes a las que se observan se extienda algo más hacia el sur en el hemisferio septentrional (y lo contrario en el caso de nuestros vecinos meridionales). Hay que decir, sin embargo, que se observan auroras brillantes e intensas en cualquier momento del ciclo solar.

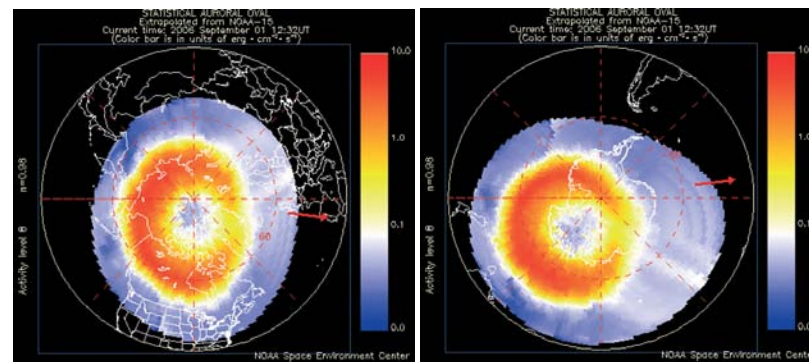


■ Imágenes del Sol tomadas por el satélite SOHO en el rango más extremo del espectro ultravioleta, en el borde con los rayos X. Las fechas, de izquierda a derecha, corresponden al 11, 13 y 17 de agosto del 2006. En las mismas se puede apreciar la rotación del Astro Rey. Créditos: NASA/ESA.



■ **Aurora sobre la cúpula geodésica de la estación de investigación Amundsen-Scott, localizada en el Polo Norte. Créditos: J. Berry, National Science Foundation.**

- La rotación del Sol: si sabemos que hoy ha ocurrido una aurora espectacular es muy probable que dentro de unos 27 días también tengamos la suerte de ver otra. Ello es debido a que si en el Sol está presente hoy una región activa, que proporciona en un día dado un mayor flujo de partículas sobre la Tierra, al ser el periodo de rotación del Sol sobre su eje de unos 27 días, es muy posible que al cabo de ese periodo de tiempo, aunque quizás debilitada, todavía queden rastros de esa región activa y nos pueda proporcionar de nuevo una buena aurora. En las figuras adjuntas en la página anterior se pueden observar tres imágenes del Sol en rayos X obtenidas el 11, el 13 y el 17 de agosto de 2006 (de izquierda a derecha). El Sol rota en el sentido contrario a las agujas del reloj y el eje de rotación es aproximadamente vertical en las imágenes. El 11 de agosto hay dos grandes regiones activas a la izquierda del disco solar, que debido a la rotación se han desplazado y aparecen a la derecha en la imagen tomada el 17 de agosto. Se aprecia también una región activa apareciendo en el limbo ese día.



■ **Mapas que muestran la actividad auroral en los hemisferios Norte y Sur, creados a partir de datos tomados con el Polar-orbiting Operational Environmental Satellite (POES). Cortesía del National Oceanic & Atmospheric Administration, EEUU.**

- Fase de la Luna: de ser posible, se ha de evitar la observación de auroras en noches de Luna llena o cerca de esta fase, cuando nuestro satélite se encuentra visible muy alto sobre el horizonte.

- Localización: cuanto más al Norte (en ese hemisferio) mayor será la probabilidad. En España, con latitud +40°, es un fenómeno muy raro. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las posiciones próximas a los polos magnéticos Norte y Sur no son adecuadas, como claramente muestran las imágenes tomadas por satélite. Groenlandia, el norte de Canadá y Alaska son sitios privilegiados en el Norte. En el Sur, la Antártida es perfecta. Al sur de Australia y Nueva Zelanda también se alcanza a ver el fenómeno con cierta frecuencia. El extremo del continente americano también permite ver auroras de manera regular.

¿Dónde ver una aurora polar?

En el Hemisferio Austral es muy complicado, salvo que se visite la Antártida y las islas circundantes. Con un poco de suerte, es posible desde el sur de Australia, especialmente desde Tasmania, o desde el sur de Nueva Zelanda. Las figuras incluidas con los óvalos aurales claramente muestran los países sobre los cuales se suelen localizar las auroras.

En lo que respecta al Hemisferio Boreal, los mejores sitios son Canadá, Alaska (EEUU) y Groenlandia (Dinamarca). La combinación de accesibilidad y meteorología hace que el sur de Groenlandia sea especialmente propicio en el mes de septiembre, que suele presentar un gran número de noches

despejadas. Hay que tener en cuenta que durante la mayor parte del verano, el Sol casi no se pone y hay claridad en el cielo. Es posible ver auroras en el norte de los países escandinavos, especialmente en la parte más septentrional de Noruega, Suecia y Finlandia. Pero las condiciones meteorológicas no son tan adecuadas.

En cualquier caso, las auroras son fenómenos transitorios, de complicada predicción, especialmente con más de unos pocos días. Nunca se puede garantizar que el Sol esté activo ni que el cielo esté despejado.

Auroras polares: ¿qué son?

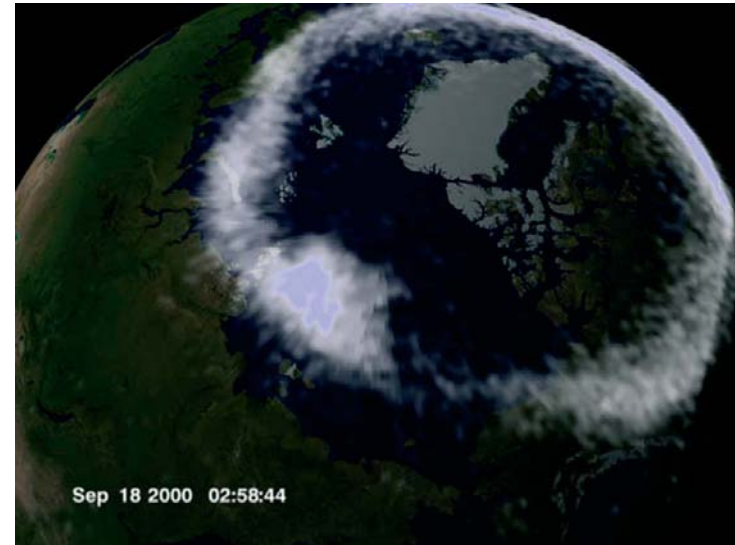
Una aurora boreal (del latín *borealis*, norte) o austral (de *australis*, sur) es un fenómeno natural que ocurre muy a menudo cerca de las regiones polares de la Tierra y que consiste en estructuras con forma de nubes, cortinas o rayos de luz, verdes, amarillos, rojos y azules de formas muy diversas que parece que danzan en el cielo nocturno.



■ Una aurora vista desde el espacio. La fotografía está tomada desde la Estación Espacial Internacional o ISS. Créditos: NASA.

Las auroras aparecen en dos óvalos centrados encima de los polos magnéticos de la Tierra, que no coinciden con los polos geográficos: la posición actual aproximada del Polo Norte magnético es 82,7° N 114,4° O. Ocurren cuando partículas cargadas (protones y electrones) procedentes

del Sol son guiadas por el campo magnético de la Tierra e inciden en la atmósfera cerca de los polos. Cuando esas partículas chocan con los átomos y moléculas de oxígeno y nitrógeno, que constituyen los componentes más abundantes del aire, parte de la energía de la colisión «excita» esos átomos a niveles de energía tales que cuando se «desexcitan» devuelven esa energía en forma de luz visible.



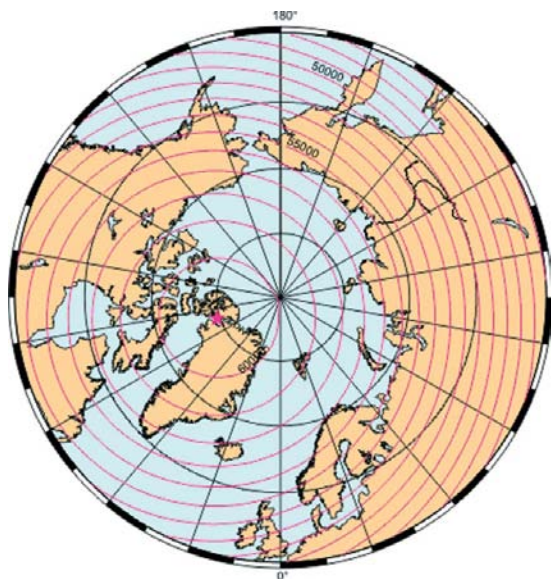
■ Otra imagen tomada desde el espacio, en la cual se observa el Polo Norte y el óvalo auroral. Además, se ve claramente que el centro de esta estructura no coincide con el polo geográfico, sino que está prácticamente sobre el magnético. Créditos: NASA.

¿Cuál es la causa de las auroras?

El Sol, situado a 150 millones de kilómetros de la Tierra, está emitiendo continuamente partículas cargadas: protones, con carga positiva, y electrones, con carga negativa. Ese flujo de partículas constituye lo que los astrofísicos llamamos el «viento solar».

El Sol, aparentemente «inactivo» cuando se le ve en fotografías tomadas en luz blanca, es muy diferente cuando se analiza en otros rangos de longitudes de onda. La superficie del Sol, llamada fotosfera, se encuentra a unos 6000 grados centígrados de temperatura. Sin embargo, cuando se asciende por la atmósfera del Sol hacia capas superiores, la temperatura aumenta en

vez de disminuir, contrariamente a lo que la intuición nos sugeriría. La temperatura de la corona solar, la zona más externa que se puede apreciar a simple vista solo durante los eclipses totales de Sol, alcanza temperaturas de hasta 3 millones de grados. El causante de ese calentamiento es el campo magnético del Sol, que forma estructuras espectaculares como se puede apreciar en las imágenes en rayos X. Al ser la presión en la superficie del Sol mayor que en el espacio vacío, las partículas cargadas que se encuentran en su atmósfera tienden a escapar y son aceleradas y canalizadas por el campo magnético del Sol, alcanzando la órbita de la Tierra y más allá. Existen fenómenos muy energéticos, como las fulguraciones o las eyecciones de masa coronal que incrementan la intensidad del viento solar.



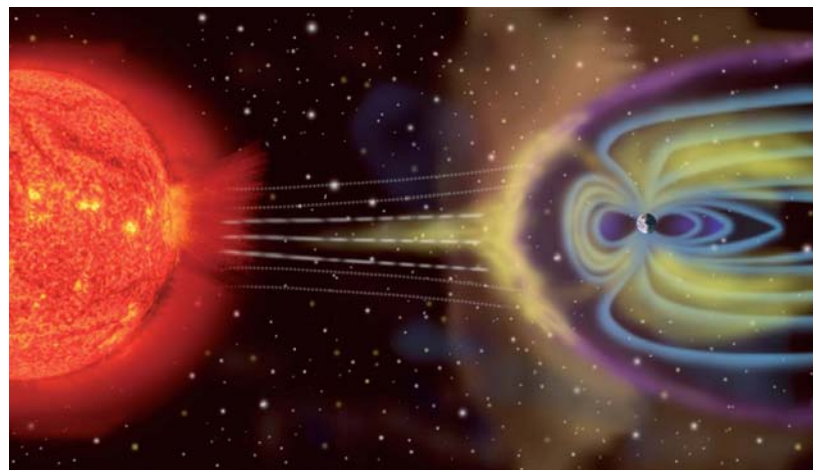
■ Diagrama que muestra la localización, en el Hemisferio Norte, de los polos magnético y geográfico. El polo magnético presenta una deriva con el tiempo, y se desplaza hacia el noroeste (más de 10 grados en los últimos 100 años). Créditos: Geological Survey of Canada.

Las partículas del viento solar viajan a velocidades desde 300 a 1000 kilómetros por segundo, de modo que recorren la distancia Sol-Tierra en aproximadamente dos días. En las proximidades de la Tierra, el viento solar es deflektado por el campo magnético de la Tierra o magnetosfera.

Las partículas fluyen en la magnetosfera de la misma forma que lo hace un río alrededor de una piedra o de un pilar de un puente. El viento solar también empuja a la magnetosfera y la deforma de modo que en lugar de un haz uniforme de líneas de campo magnético como las que mostraría un imán imaginario colocado en dirección norte-sur en el interior de la Tierra, lo que se tiene es una estructura alargada con forma de cometa con una larga cola en la dirección opuesta al Sol.

Las partículas cargadas tienen la propiedad de quedar atrapadas y viajar a lo largo de las líneas de campo magnético, de modo que seguirán la trayectoria que les marquen estas.

Las partículas atrapadas en la magnetosfera colisionan con los átomos y moléculas de la atmósfera de la Tierra, típicamente oxígeno (O) y nitrógeno (N) atómicos, y nitrógeno molecular (N_2) que se encuentran en su nivel más bajo de energía, denominado nivel fundamental. El aporte de energía proporcionado por las partículas perturba a esos átomos y moléculas, llevándolos a estados excitados de energía. Al cabo de un tiempo muy pequeño, del orden de las millonésimas de segundo o incluso menor, los átomos y moléculas vuelven al nivel fundamental, y devuelven la energía en forma de luz. Esa luz es la que vemos desde el suelo y denominamos «aurora».

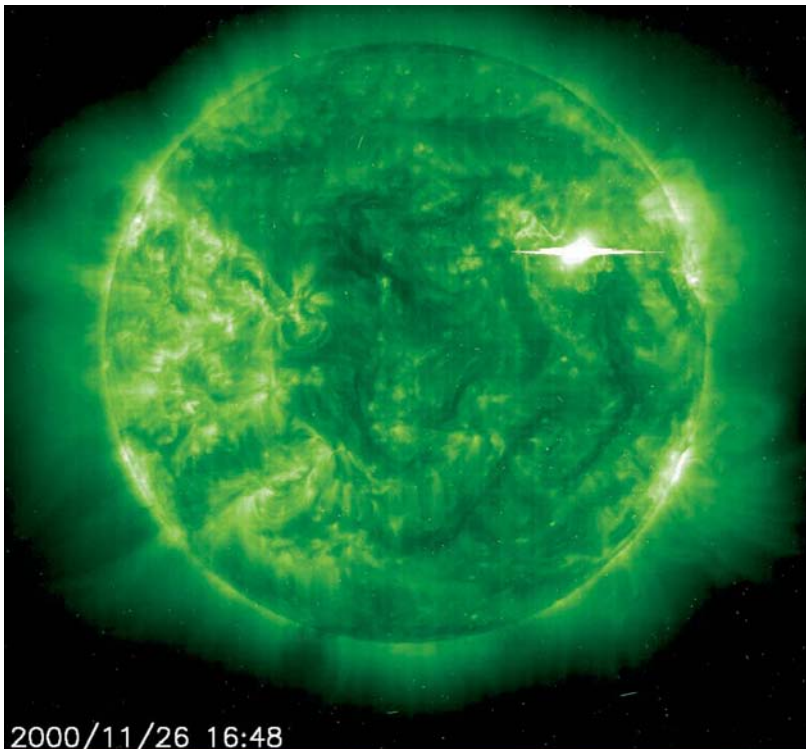


■ Diagrama, no a escala, que muestra la interacción entre el viento solar y la magnetosfera terrestre. Créditos: NASA/JPL.

Las auroras ocurren típicamente entre los 95 y los 1000 kilómetros de altura. Las auroras se mantienen por encima de los 95 km porque a esa altitud la atmósfera es tan densa y los choques con las partículas cargadas ocurren tan frecuentemente que los átomos y moléculas están prácticamente en reposo. Por otro lado, las auroras no pueden estar más arriba de los 500-1000 km porque a esa altura la atmósfera es demasiado tenue -poco densa- para que las pocas colisiones que ocurren tengan un efecto significativo.



■ Esquema que muestra la generación de una aurora por interacción de la magnetosfera terrestre con el viento solar. Créditos: Digital Radiance.

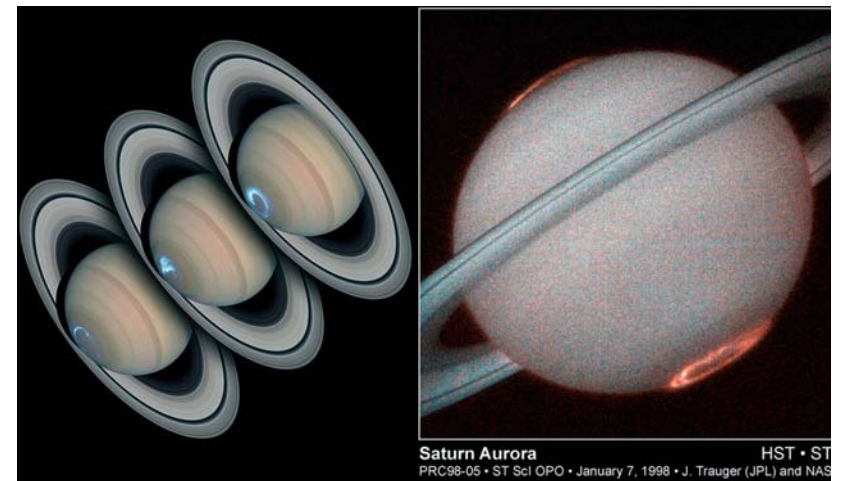


■ El Sol visto por SOHO, un satélite de rayos X. Créditos: NASA /ESA.

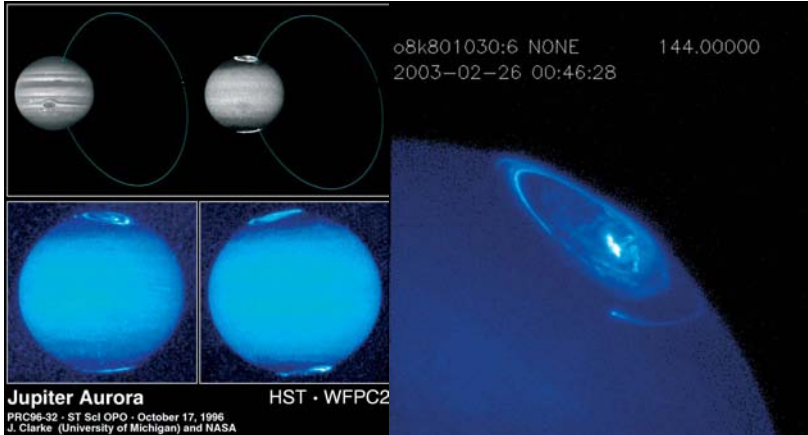
Más allá de la Tierra: auroras en el Sistema Solar

Las auroras polares no solo se encuentran en la Tierra; también en los planetas gaseosos gigantes del Sistema Solar. Aunque los mecanismos de formación son distintos, el fundamento físico es muy similar. Se necesita un campo magnético, que en el caso de Saturno y Júpiter es muy intenso; partículas cargadas, que las proporciona el viento solar; y una atmósfera contra la cual esas partículas cargadas de alta energía puedan colisionar. En las figuras adjuntas se muestran imágenes espectaculares de estos dos planetas gaseosos, obtenidas con el Telescopio Espacial Hubble, donde se ven con mucha claridad auroras sorprendentes. En el caso de Júpiter las auroras se producen por la interacción de los campos magnéticos del planeta y de Ío, uno de los satélites que descubrió Galileo a comienzos del siglo XVII, en unas de las primeras observaciones astronómicas realizadas con un telescopio. La intensidad de las corrientes eléctricas que se generan en esas estructuras es de miles de amperios, extremadamente alta.

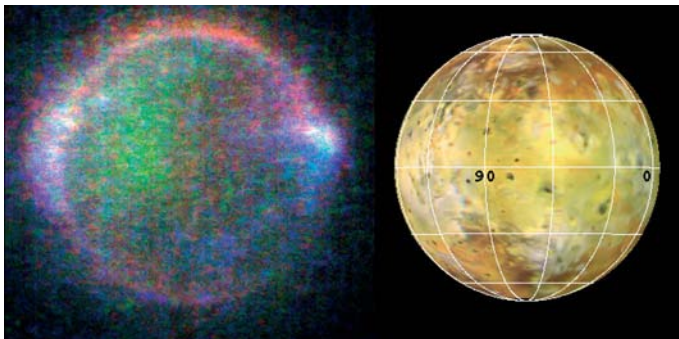
La sonda Mars Express ha observado también auroras en el planeta Marte. En este caso, el fenómeno tampoco está producido por un intenso campo magnético análogo al terrestre (Marte carece de él), sino por campos magnéticos locales asociados a la corteza marciana.



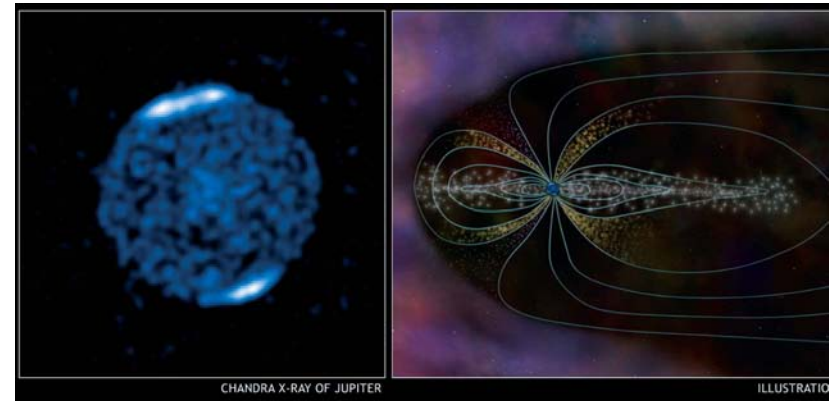
■ Izquierda: Fotocomposición que muestra la evolución de una aurora en Saturno. Las imágenes fueron captadas por la sonda Cassini/Huygens. Créditos: NASA/ESA/Agencia Espacial Italiana. Derecha: Foto del HST donde se observan las auroras de Saturno en ambos polos.



■ Izquierda: Auroras en Júpiter, observadas por el Hubble Space Telescope. Están relacionadas con la presencia del satélite Ío, muy activo volcánicamente. Derecha: Un detalle de uno de los polos de Júpiter, observado en el ultravioleta. Créditos: NASA/ESA.

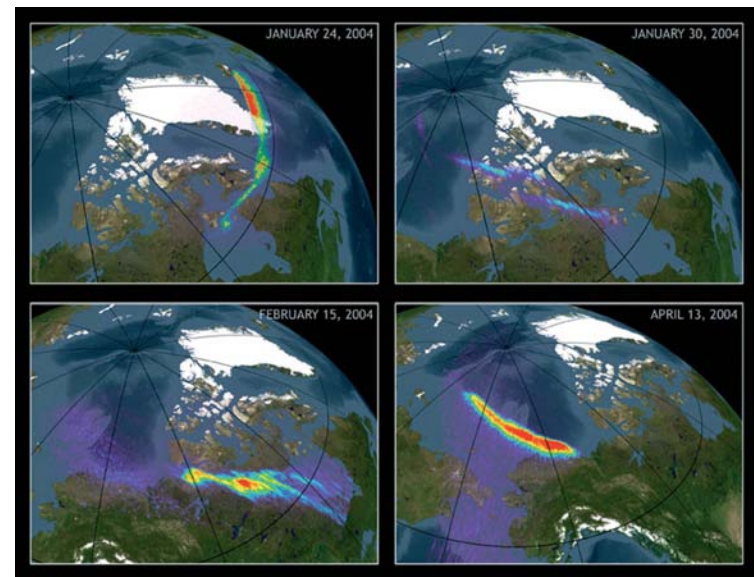


■ Ío, uno de los grandes satélites de Júpiter, caracterizado por su activo vulcanismo, también presenta una fenomenología similar a las auroras terrestres, pero en este caso ligada al campo magnético joviano. La imagen de la izquierda fue tomada desde la nave Galileo durante un eclipse del satélite, cuando entró en el cono de sombra del planeta. La fotografía de la derecha corresponde a la superficie de Ío, cuando está iluminado completamente por la luz del Sol. El color amarillo es producido por el alto contenido de compuestos de azufre presentes en su superficie. Créditos: NASA/JPL/University of Arizona.



■ Las auroras de Júpiter detectadas en rayos X por el observatorio Chandra (crédito NASA). La figura de la derecha muestra un diagrama con la magnetosfera del planeta.

¿Existirá este tipo de fenomenología en los exoplanetas? ¿Cómo será una aurora en alguno de los exóticos planetas descubiertos fuera de nuestro sistema planetario?



■ En nuestro planeta, las auroras también se pueden observar en rayos X, como se ve en las figuras adjuntas. Créditos: NASA/Chandra.



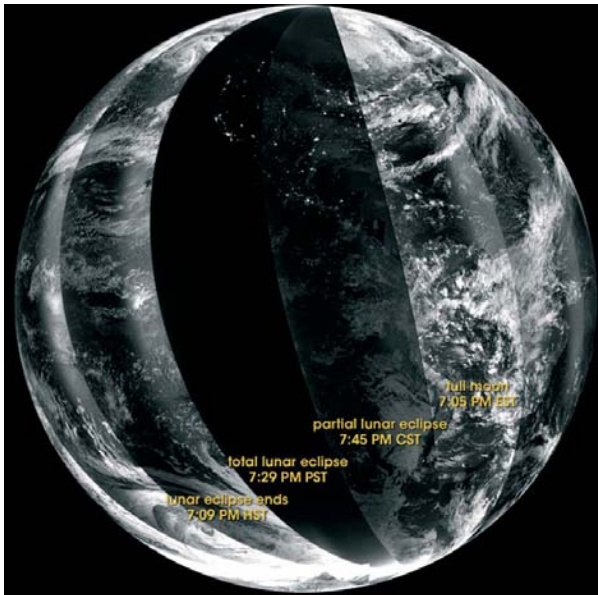
Mármol azul

Tal vez una de las imágenes más conocidas de entre todas las obtenidas por la misión Apollo. Curiosamente, el objetivo de la misma no fue la Luna, nuestro satélite, sino nuestro planeta. La fotografía, denominada en inglés «Blue Marble» (canica azul), fue realizada durante la misión Apollo XVII (la última del programa) y fue la primera obtenida con el disco de la Tierra completamente iluminado. De indiscutible belleza, también transmite un claro mensaje: todos estamos en la misma nave, y lo que hagamos con el planeta es responsabilidad nuestra.

Un eclipse lunar desde el espacio: el efecto sobre la Tierra

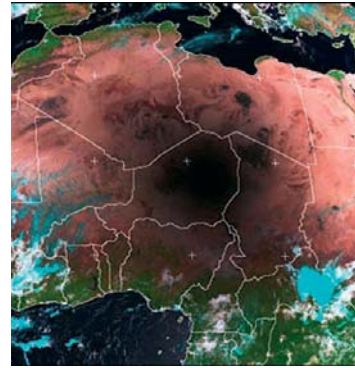
Los eclipses solares y lunares se producen con cierta regularidad, siendo más frecuentes los últimos. Lo que no es tan común es ver el efecto que producen sobre nuestro planeta. El 20 de febrero de 2008 se produjo un eclipse lunar que nos ha dejado unas sorprendentes imágenes captadas desde satélites en órbita.

Aunque la reflectividad de la superficie lunar (albedo en jerga astronómica) es muy baja, la Luna nos devuelve parte de la luz del Sol y es capaz de iluminar de manera eficiente la noche, como cualquiera puede comprobar lejos de las ciudades durante un buen claro de Luna cuando esta está llena. Sin embargo, durante un eclipse lunar, nuestro satélite deja de estar iluminado por el Sol. Así, deja sin iluminación natural la noche terrestre: durante unas horas tenemos una Luna en oposición, una verdadera noche oscura. La imagen adjunta, una fotocomposición, muestra este efecto de manera bastante efectiva. La secuencia fue tomada durante el eclipse del 20-21 de febrero de 2008.



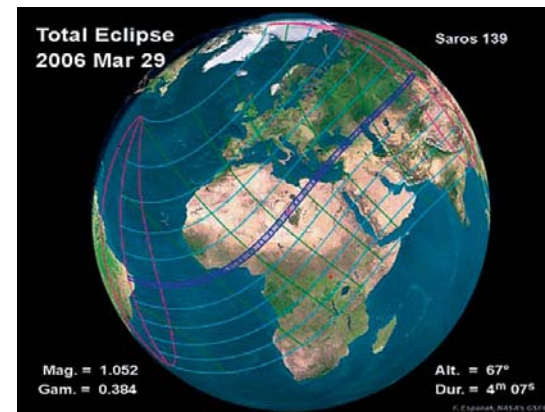
■ La Tierra observada desde el satélite meteorológico DMSP F16. La imagen es una composición de varias observaciones según avanzaba el eclipse lunar. Durante el eclipse total, la Luna no refleja la luz del Sol y por tanto no ilumina la parte nocturna de nuestro planeta. Créditos: NOAA National Geophysical Data Center y U.S. Air Force Weather Agency.

Mirando desde el otro lado: el eclipse total de Sol desde el espacio

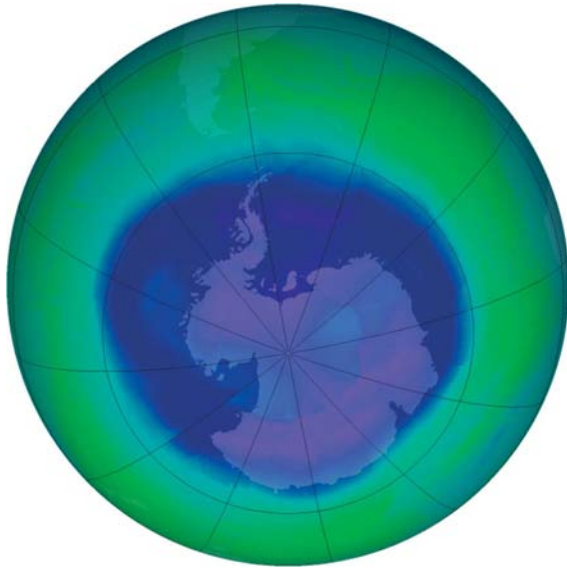


■ La sombra de la Luna proyectada sobre África. Créditos: Eumetsat.

El eclipse total de Sol del 29 de marzo del 2006 nos dejó una plétora de bellísimas instantáneas, tomadas desde diferentes lugares. De todas, la más sorprendente no fue tomada desde la superficie de nuestro planeta. Corresponde al satélite Eumetsat y muestra la sombra de la Luna proyectada sobre África en el momento en el que el eclipse total está en pleno apogeo. Un completo cambio en nuestra perspectiva.



■ El recorrido de la sombra producida por el eclipse sobre la superficie terrestre. Créditos: NASA.



Parte III

La actividad humana, el cambio climático y sus consecuencias

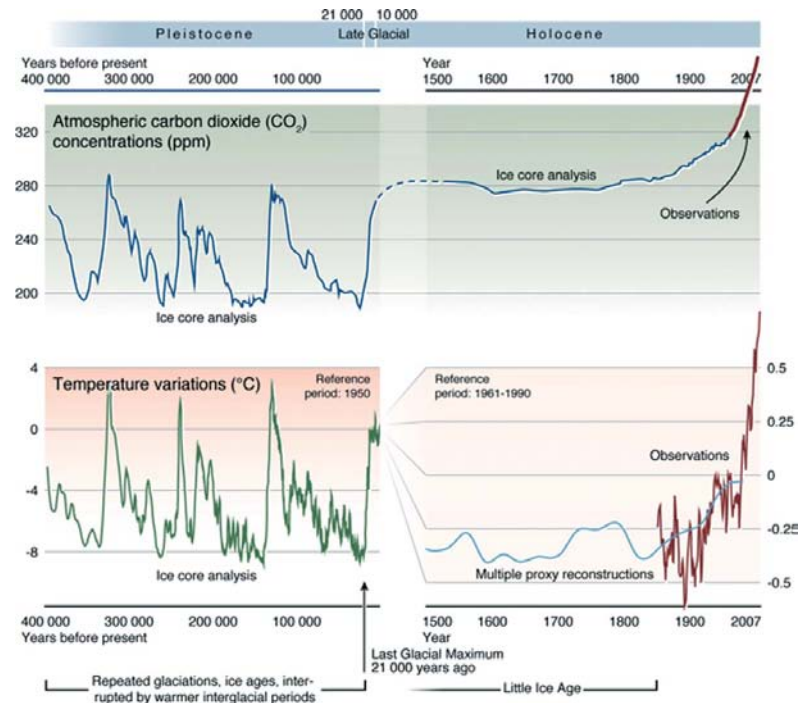
■ Imagen de la Antártida tomada en septiembre de 2008 en la que se aprecia la baja concentración de ozono medido en unidades Dobson.

Créditos: Ozone Monitor Instrument, a bordo del satélite Aura (NASA).

Cambio climático

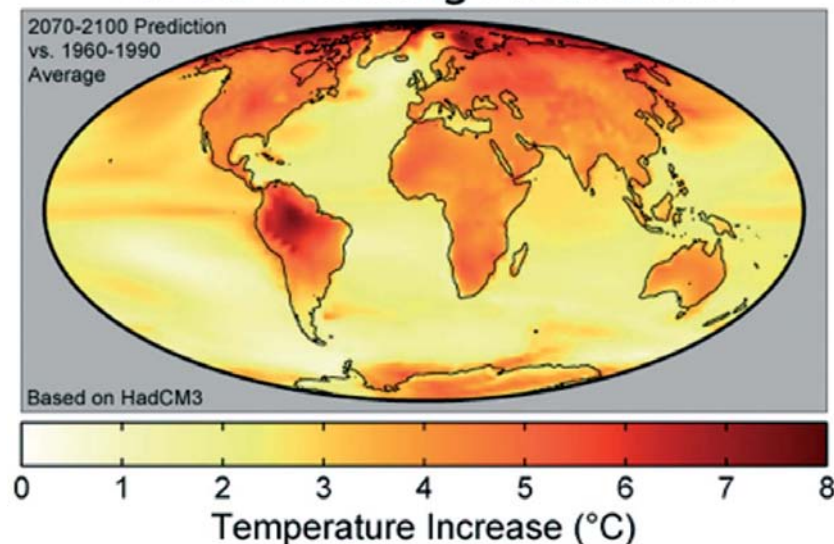
Existen dos factores externos que determinan la climatología de nuestro planeta: el Sol, como fuente primaria de energía, y el material en suspensión en la atmósfera (aerosoles, polvo, humo y el hollín).

El Sol, formado hace unos 4600 millones de años, ha cambiado de manera significativa desde el momento en que comenzó a producir energía mediante reacciones nucleares en su interior. Su radio se ha incrementado un 12%, su temperatura superficial ha hecho lo propio en unos 200 °C, y la cantidad de energía que recibe la Tierra ha pasado a ser un 50% superior. En cualquier caso, nuestra estrella se encuentra en una etapa tranquila y las variaciones seculares que experimenta son extraordinariamente lentas.



■ Durante los últimos cientos de miles de años los registros geológicos muestran variaciones acompasadas tanto de la concentración de dióxido de carbono, uno de los gases responsables del efecto invernadero, como de la temperatura media. El incremento durante los últimos 60 años ha sido especialmente dramático.

Global Warming Predictions



■ **Predicciones sobre los incrementos de las temperaturas medias en diferentes lugares del globo para el final del siglo XXI. Aunque sujetas a grandes incertidumbres, que implican subidas de entre 2 hasta 5 grados centígrados de promedio, la subida parece ser que sí se producirá, provocando un gran impacto ecológico y social. Créditos: R. A. Rohde.**

El material en suspensión tiene diferentes orígenes: desde vulcanismo o incendios de masa forestales, pasando por la actividad humana con sus procesos industriales.

Estos factores externos afectan a otros, de los que a su vez se retroalimentan, incluyendo a las nubes, al ciclo de carbono, a la circulación de las corrientes oceánicas, las precipitaciones y al nivel del mar. Las nubes llegan a reflejar un tercio de la energía procedente del Sol, y por tanto son actores principales en la climatología. Por otra parte, las corrientes circulatorias oceánicas son verdaderas correas de transmisión de los flujos energéticos en nuestro planeta. Cualquier alteración en las mismas implica cambios climáticos locales drásticos y un reajuste de los otros factores y de la climatología del planeta.

Las predicciones de Casandra

Diciembre y las hojas no han caído todavía. ¿Casualidad o cambio climático? Surgen noticias alarmistas por todas partes. Se dice que hay más tornados, inundaciones, o lluvias torrenciales que nunca. También es cierto que hay más testigos y más flujo de información, y que los

medios en muchas ocasiones tienden a magnificar los desastres para tener más impacto. ¿Qué hay que creer?

Existen suficientes evidencias para aceptar como un hecho que el cambio climático está aquí. Es más, parece ser que la mayor parte de él está provocado por la intervención humana, por nuestra pésima gestión de los recursos naturales. Las evidencias son múltiples, y en muchos casos dramáticas, como el deshielo masivo de glaciares por doquier y del casquete polar ártico.

Los modelos de evolución atmosférica son cada día más sofisticados, y sus predicciones, con todas sus incertidumbres, no son nada halagüeñas. El futuro, incluso el más próximo, no parece muy prometedor. Científicos del NCAR (Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas, en EEUU), hablan ya de procesos de retroalimentación que podrían conducirnos a un desastre global si no tomamos medidas urgentes ya. Y aun así, las medidas correctivas no se notarían hasta dentro de unos decenios. Estos especialistas, que no tienen ningún interés directo en fomentar el alarmismo social, nos están avisando de las consecuencias de nuestros actos, de nuestro modelo vital, que está condenado a desaparecer. Podríamos estar a tiempo de cambiarlo de manera ordenada, de reconducir nuestras sociedades hacia modelos de crecimiento (o de no-crecimiento) más equilibrados, con una gestión óptima de recursos y desechos. Con otras fuentes energéticas que no condenen a la extinción a la vida sobre el planeta. Pero son como Casandra, la sacerdotisa de Apolo que predijo el desastre en Troya, aunque nadie creyó sus palabras. En el caso del cambio climático, el común de la gente o no cree en la posibilidad de que el desastre pueda aparecer, o prefiere ignorar el problema, hasta que llegue. Quieren unos años de felicidad, ignorando lo que podría avecinarse. Es la política del avestruz.

Aunque los modelos climáticos se equivoquen, aunque los desastres globales nos queden muy lejos, aunque tengamos garantizada nuestra forma de vida durante toda nuestra existencia, ¿es justo seguir con esta forma de consumir, de dilapidar recursos naturales? ¿Condenar a las próximas generaciones a resolver un problema que nosotros hemos creado? Solo por la posibilidad de que el efecto sea relevante merece que lo tengamos en cuenta y que implementemos medidas correctivas. Otros modelos sociales y económicos son posibles, sin por ello requerir la renuncia a nuestro bienestar. Y tal vez son las pequeñas políticas las que mejor y más rápido resultado proporcionen.

El papel del dióxido de carbono y del ozono

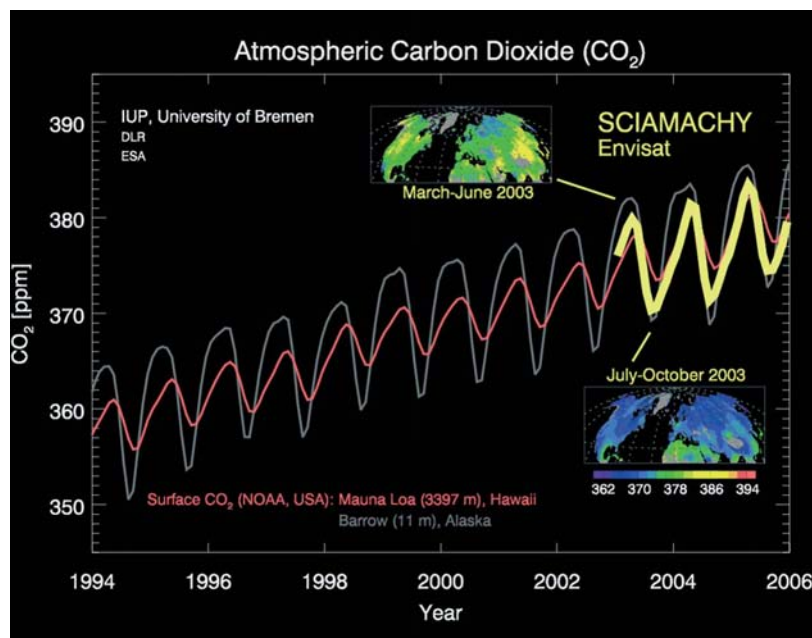
La atmósfera terrestre está compuesta en su mayor parte por dos gases: dióxido de nitrógeno (N_2) y oxígeno molecular (O_2), que suman prácticamente el 78 y el 21%, respectivamente. En cantidades menores se puede encontrar gases como argón, neón, helio, vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2) y ozono (O_3), entre otros. Precisamente, estos dos últimos compuestos químicos, a pesar de estar presentes en una fracción mínima (0,033% y 0,001% aproximadamente), juegan un papel esencial en la climatología y en la posibilidad de que haya vida macroscópica.

El CO_2 es uno de los gases principales en el denominado «efecto invernadero», y provoca que parte de la energía solar que llega a la superficie del planeta no vuelva a escapar al vacío interplanetario al ser remitida por la superficie del planeta. Ello es debido a que la energía llega princi-

palmente como luz visible, que penetra sin ser obstaculizada por estos gases, y es remitida por la superficie en el rango infrarrojo, no visible para el ojo humano pero detectable como sensación calórica cuando exponemos nuestra piel a una fuente de este tipo. Los rayos infrarrojos sí son absorbidos por el CO_2 (y otros gases que también contribuyen a este efecto, como el vapor de agua y el metano o CH_4), lo que implica que el planeta alcanza un equilibrio térmico a una temperatura más alta que la que le correspondería en principio por la insolación debida a nuestra estrella, de manera análoga a la de un invernadero, cuya temperatura es sensiblemente superior a la de sus alrededores (en este caso, es el vidrio el que no deja escapar el calor).

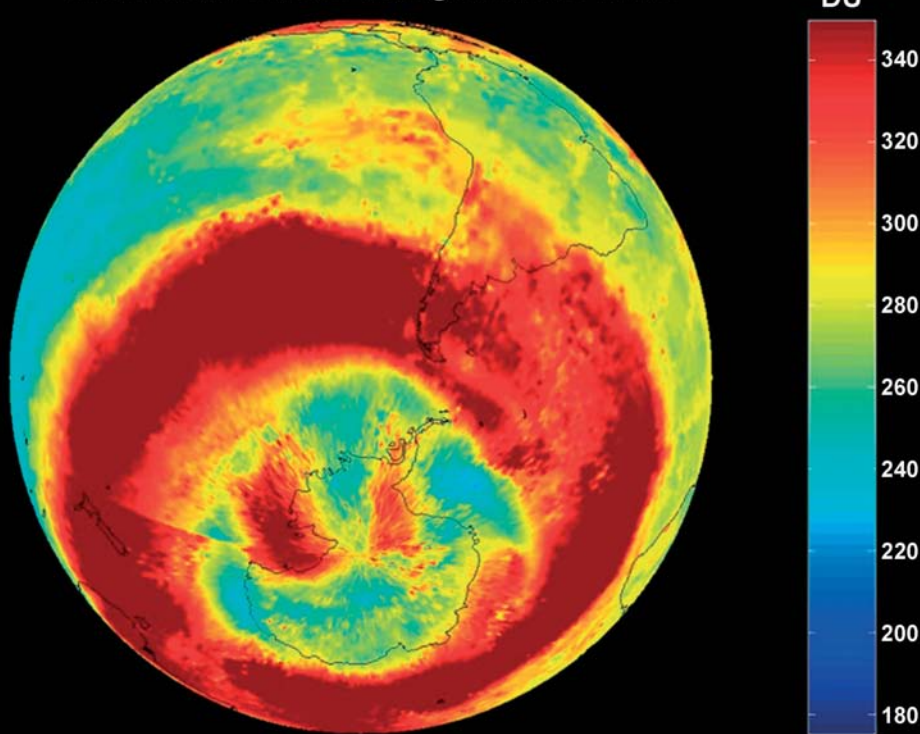
La evolución de la concentración atmosférica de CO_2 , determinada principalmente a partir de medidas realizadas en burbujas atrapadas en el hielo, muestra que existe una variación, incluyendo cierta regularidad, durante unos 650 000 años, manteniéndose entre las 200 y las 280 partes por millón (por debajo del 0,03%). Sin embargo, el incremento en los últimos 50 años ha sido súbito y ha producido claramente concentraciones muy por encima de la media. En la actualidad, nos estamos acercando a 0,04%. Una cantidad nimia, pero de crucial importancia, ya que las variaciones de temperatura siguen un comportamiento similar a las del CO_2 . Los incrementos rápidos de este gas durante los últimos decenios parecen estar ligados a la actividad humana.

Por otra parte, el ozono actúa como escudo de la peligrosa radiación ultravioleta que proviene del Sol. Al igual que la radiación infrarroja, el ojo humano no es capaz de detectarla, aunque las exposiciones a ella pueden provocar quemaduras en la piel. La más energética, altamente mutagénica ya que interactúa con el ADN celular, no llega a la superficie de nuestro planeta en condiciones normales, debido a que también reacciona con el ozono presente en las capas altas de la atmósfera. Sin embargo, la actividad industrial y en concreto la dispersión en la atmósfera de compuestos clorofluorocarbonados (CFCs), que convierten el ozono en oxígeno diatómico, que no tiene las mismas propiedades protectoras, ha provocado la aparición de un inmenso agujero en el Polo Sur del planeta, aunque el efecto también se puede apreciar en el hemisferio boreal. La disminución de la concentración de este gas tiene unos efectos perniciosos para la salud de aquellas poblaciones expuestas directamente a la radiación ultravioleta. Desde la firma del Protocolo de Montreal en 1987 se intenta controlar la producción de sustancias que contribuyen a la desaparición del ozono.



■ **Evolución de la concentración de CO_2 en el hemisferio Norte. Las variaciones periódicas que corresponden a una escala de un año son debidas a los flujos naturales por la estacionalidad de la vegetación, que absorbe CO_2 durante la primavera y el verano, y lo remite durante el otoño y el invierno. Créditos: ESA - DLR - IUP, Univ. Bremen.**

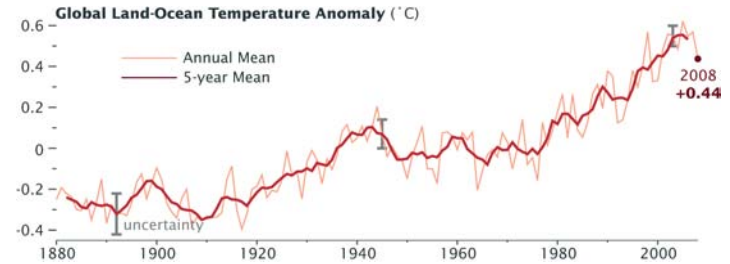
AIRS Ozone Burden during Antarctic Winter



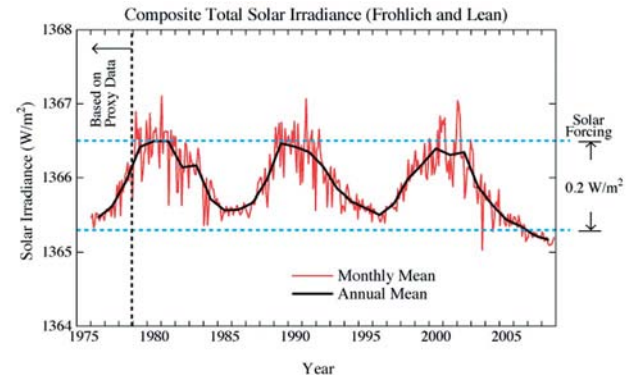
August 11, 2005

■ La combinación de tres diferentes técnicas de observación en los rangos óptico, infrarrojo y de las microondas nos permite reconstruir una imagen tridimensional de la atmósfera. En la imagen se observa la concentración de ozono sobre el hemisferio austral, y baja concentración sobre la Antártida. La escala está en Unidades de Dobson (DU, o $2,69 \times 10^{20}$ moléculas por metro cuadrado), que se utiliza para este objetivo de manera estándar. Créditos: Atmospheric Infrared Sounder Experiment, en el satélite Aqua.

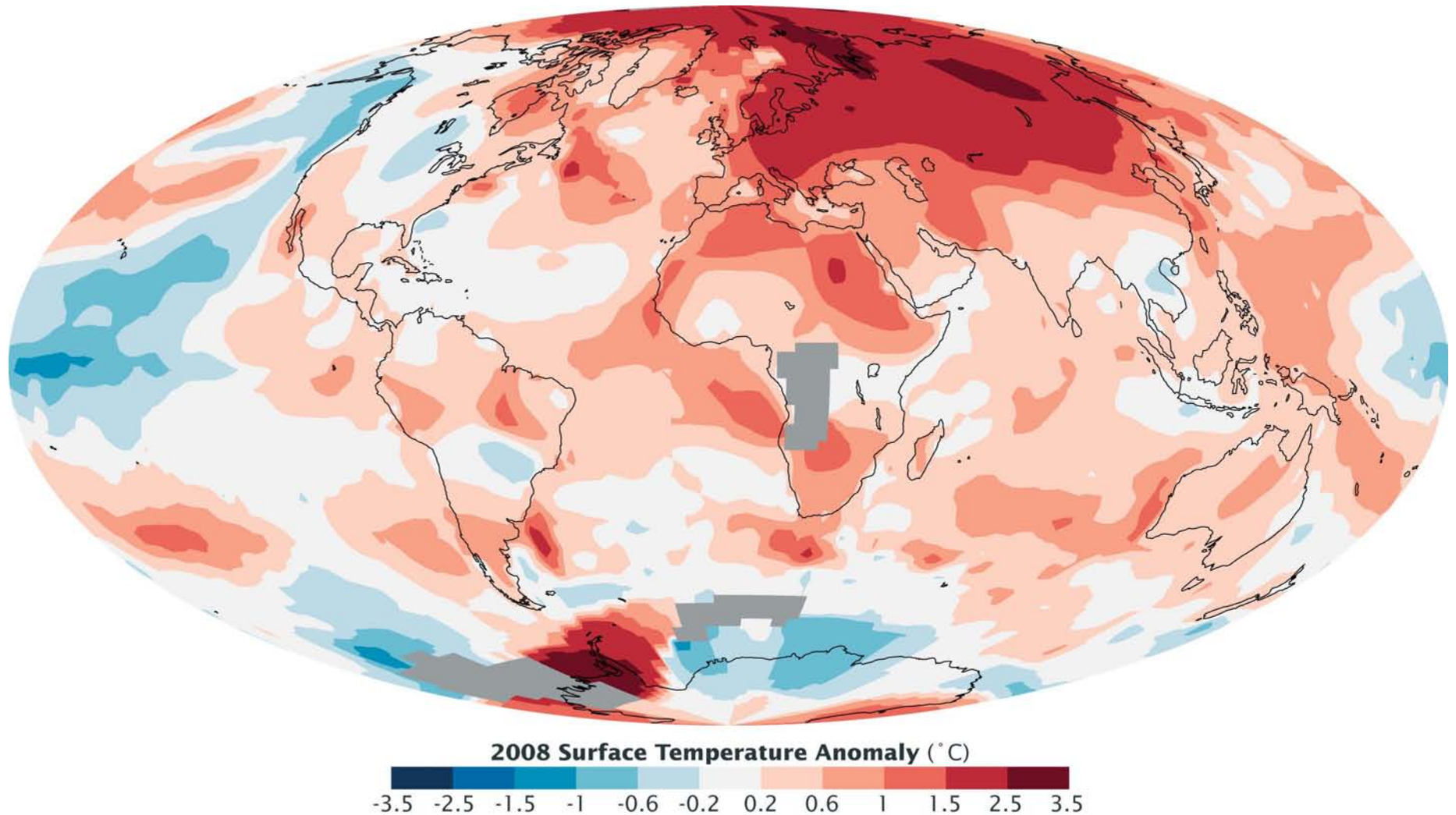
La evolución de la temperatura media y los ciclos solares de actividad



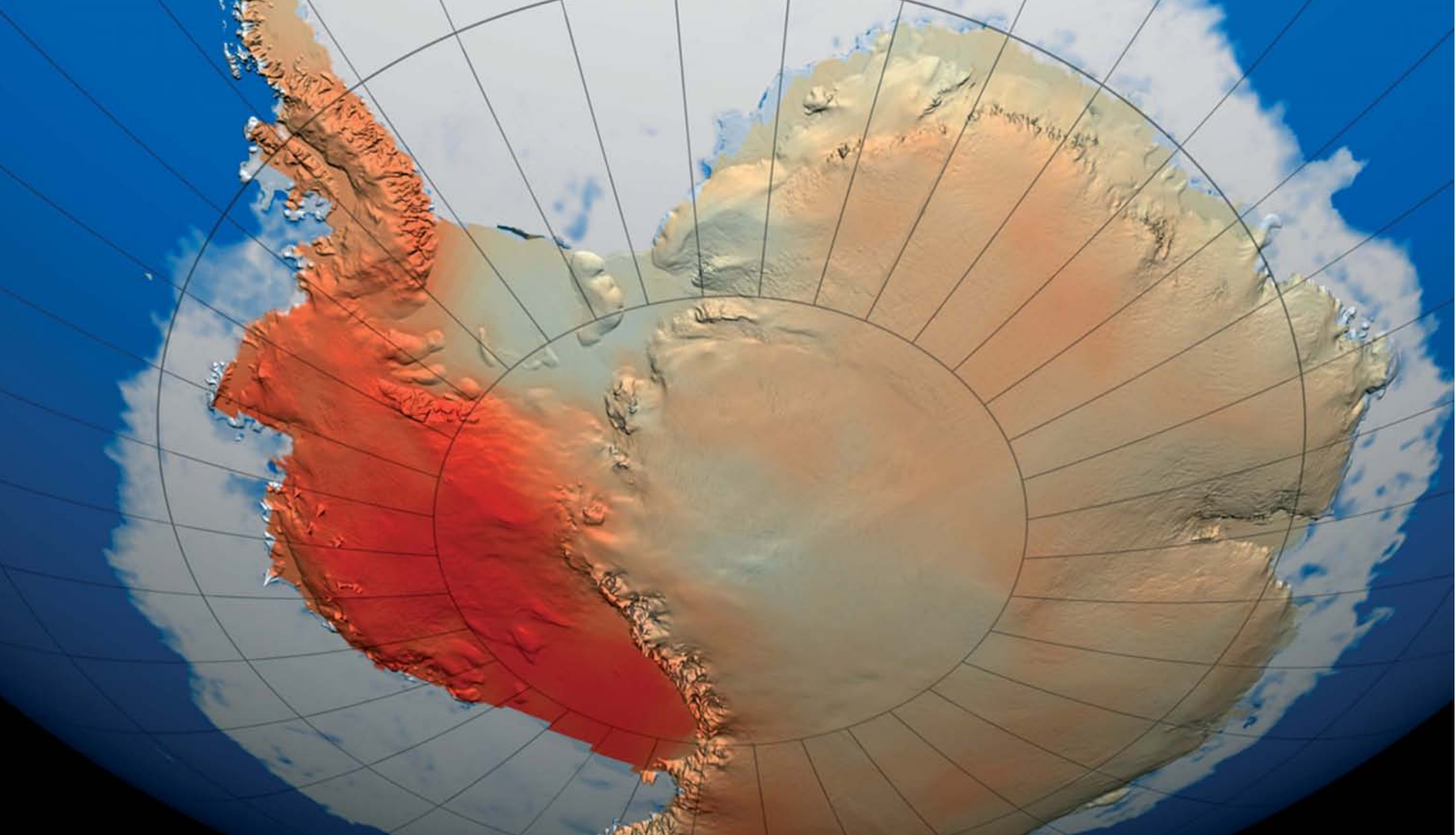
■ Desde que se empezaron a medir las temperaturas de manera fiable, en 1880, las medias anuales o quinquenales han experimentado un cambio significativo, especialmente durante los últimos treinta años. Aunque el año 2008 no ha sido el más caluroso de la secuencia histórica, su media sigue estando entre los diez valores más altos de los últimos 128 años.



■ El Sol, nuestra fuente de energía primaria, experimenta ciclos de actividad que duran 11 años aproximadamente. Durante ese periodo, la cantidad de energía que recibimos en la Tierra cambia en una fracción mínima, pero detectable (menos de un 0,02%). En los registros históricos existen evidencias de anomalías en los periodos de actividad solar, y algunos autores han intentado ligarlos a variaciones climáticas tales como la «pequeña edad de hielo», que duró desde el siglo XIV hasta el XIX. Según aquellos, estaría relacionada con el denominado mínimo de Maunder, que duró desde 1645 a 1715, aunque es posible que la variación climática solo estuviera circunscrita al hemisferio Norte. Durante los tres ciclos de actividad solar, el valor medio de la insolación no ha variado. Sin embargo, la temperatura media del planeta se ha incrementado en 0,4 °C.



■ El diagrama muestra la variación de temperatura respecto a las medias locales calculadas durante el periodo 1950-1980. Aquellas regiones con temperaturas por debajo de la media se muestran con colores azules, mientras que las que las superan están coloreadas con la gama roja. Las temperaturas promedio de la mayor parte del planeta han superado de manera significativa sus medias, especialmente en el caso del este de Europa, Rusia, el Ártico y la península antártica. Las relativamente bajas temperaturas medidas en el Pacífico están ligadas al fenómeno de la Niña, que comenzó en el 2007. Créditos: NASA y Robert Simmon, basado en datos procedentes del Goddard Institute for Space Studies.

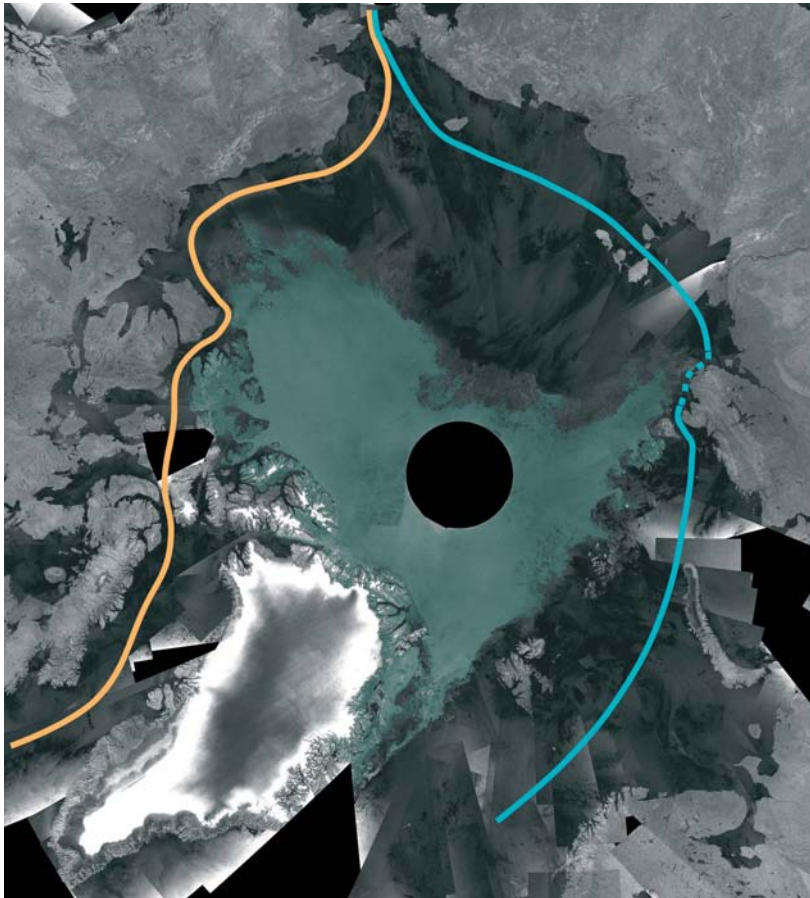


■ El continente antártico actúa como un regulador esencial del clima. Durante mucho tiempo se pensaba que los incrementos globales de la temperatura no lo afectaban. Sin embargo, estudios recientes, que combinan datos de estaciones terrestres y tomados con satélites, indican claramente que la península antártica se ha calentado de manera significativa, mucho más que el resto del continente. Un fenómeno análogo está ocurriendo en su homólogo septentrional, en Groenlandia, en la que existen regiones, especialmente las más boreales, en donde se han registrado incrementos muy notables de temperaturas. Créditos: Trent Schindler, NASA Goddard Space Flight Center.



El Paso del Noroeste, en el Ártico, abierto por primera vez

Desde la salida de los primeros seres humanos de África, la exploración de nuestro planeta se ha realizado en etapas. Una de las más activas sucedió en el siglo XIX. Y uno de los mitos que la propulsó fue la búsqueda del Paso del Noroeste, un canal que permitiría la comunicación directa entre el Atlántico Norte y el Pacífico. Ahora, por primera vez en la historia, este paso está abierto. La Agencia Espacial Europea, con su satélite Envisat, nos muestra unas espectaculares imágenes del Polo Norte y de las posibles vías de navegación.

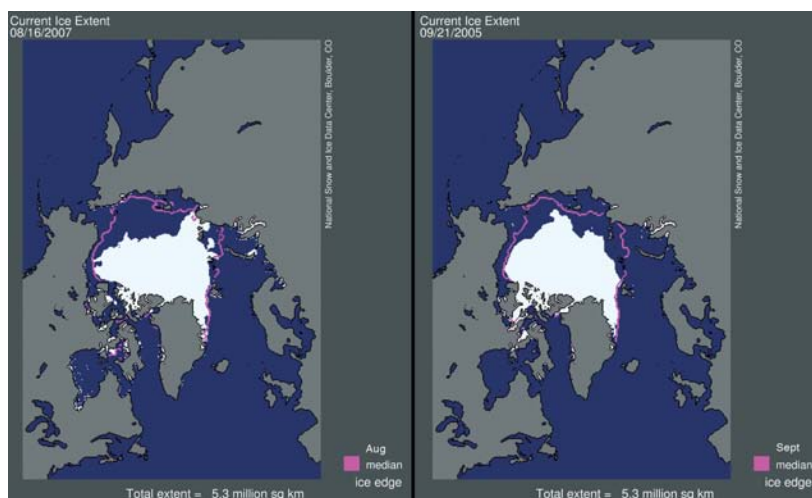


■ El Polo Norte, visto por el satélite Envisat, y las dos posibles vías de navegación, la canadiense, en naranja y abierta en la actualidad, y la siberiana, en azul y parcialmente bloqueada. Créditos: ESA/Envisat.



■ El estrecho de McClure, perteneciente al archipiélago canadiense del Ártico, visto por el satélite Envisat el 31 de agosto del 2007. Este paso ha estado completamente abierto desde comienzos de ese mes. Créditos: ESA/Envisat.

John Barrow, segundo secretario del Almirantazgo británico durante gran parte del siglo XIX, fue el verdadero impulsor de la búsqueda del Paso del Noroeste y del comienzo de la exploración centroafricana. El Almirantazgo, con objeto de evitar el peligroso estrecho de Magallanes o el paso de Drake, invirtió una ingente cantidad de dinero para cartografiar la región al norte de Canadá y encontrar un paso hacia el oeste. Numerosas expediciones se quedaron varadas durante uno, dos o tres años por las duras condiciones, y por la imposibilidad de penetrar el mar helado aun durante el verano ártico. En un futuro próximo este paso puede convertirse en navegable.

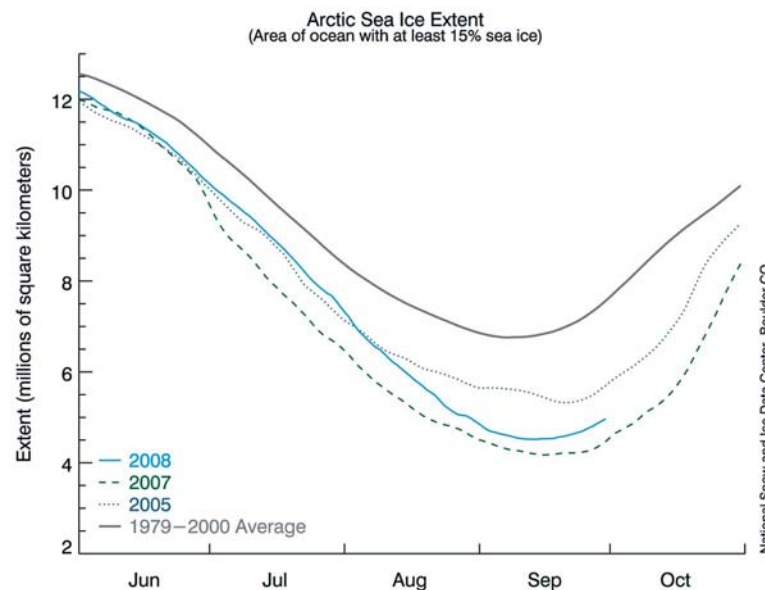


■ **Comparación entre el máximo-mínimo histórico anterior (septiembre de 2005), con el mínimo absoluto de la superficie cubierta por hielo registrado en agosto del 2007, así como con las medias de estos dos meses (en magenta), que es cuando la superficie cubierta de hielo es menor. El 16 de agosto del 2007 la capa de hielo ártica alcanzó su mínimo histórico, superando ampliamente el récord anterior de septiembre del 2005. Créditos: NSIDC.**

La Agencia Espacial Europea tiene un programa específico de seguimiento de nuestro planeta, y ha venido estudiando de manera sistemática los polos, que son cruciales para entender la evolución del clima. Ahora, el satélite Envisat nos muestra que, por primera vez desde que existen registros históricos, el mítico Paso del Noroeste se encuentra parcialmente despejado y es posible que se abra, en un futuro no muy lejano, a la navegación comercial, reduciendo notablemente el tiempo de tránsito

entre puntos del Pacífico y del Atlántico Norte. Y de paso, produciendo un efecto negativo sobre la economía de Panamá, cuyo canal, incluida su ampliación, podría quedar obsoleto. Ejemplo claro de cómo la economía es una cuestión que no se pueda separar de la climatología. En cualquier caso, una evidencia más de la rapidez del cambio climático y de las consecuencias que está teniendo sobre la economía y la población, así como el efecto del mismo en la geopolítica.

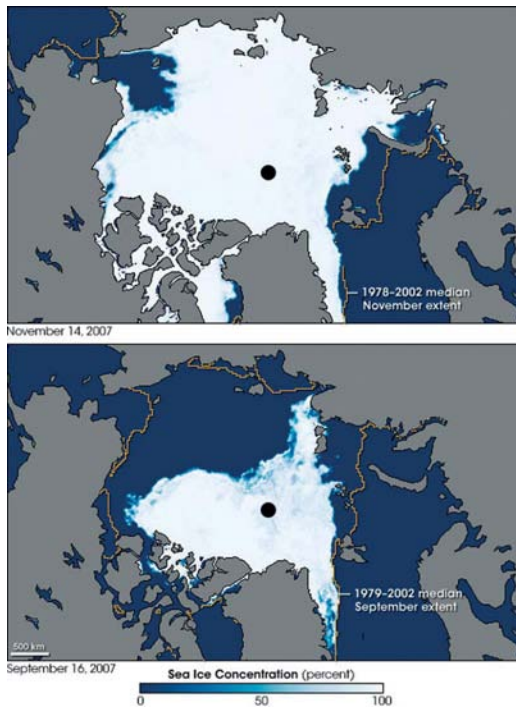
En cualquier caso, en el verano del 2007 se alcanzó la mínima superficie cubierta por hielo desde que empezaron a tomarse imágenes por satélite. La comparación es asombrosa. Y muy triste. Las consecuencias, de cumplirse las predicciones, nefastas. Hay estudios que indican que el océano Ártico se descongelará durante los veranos, tal vez dentro de 30 o 50 años, incluso mucho antes. En el peor escenario posible, puede que mucho antes.



■ **La evolución de la extensión del hielo ártico durante los meses de verano. En el último año medido, el 2008, se alcanzó el segundo mínimo después del histórico del 2007. Créditos: National Snow and Ice Data Center.**

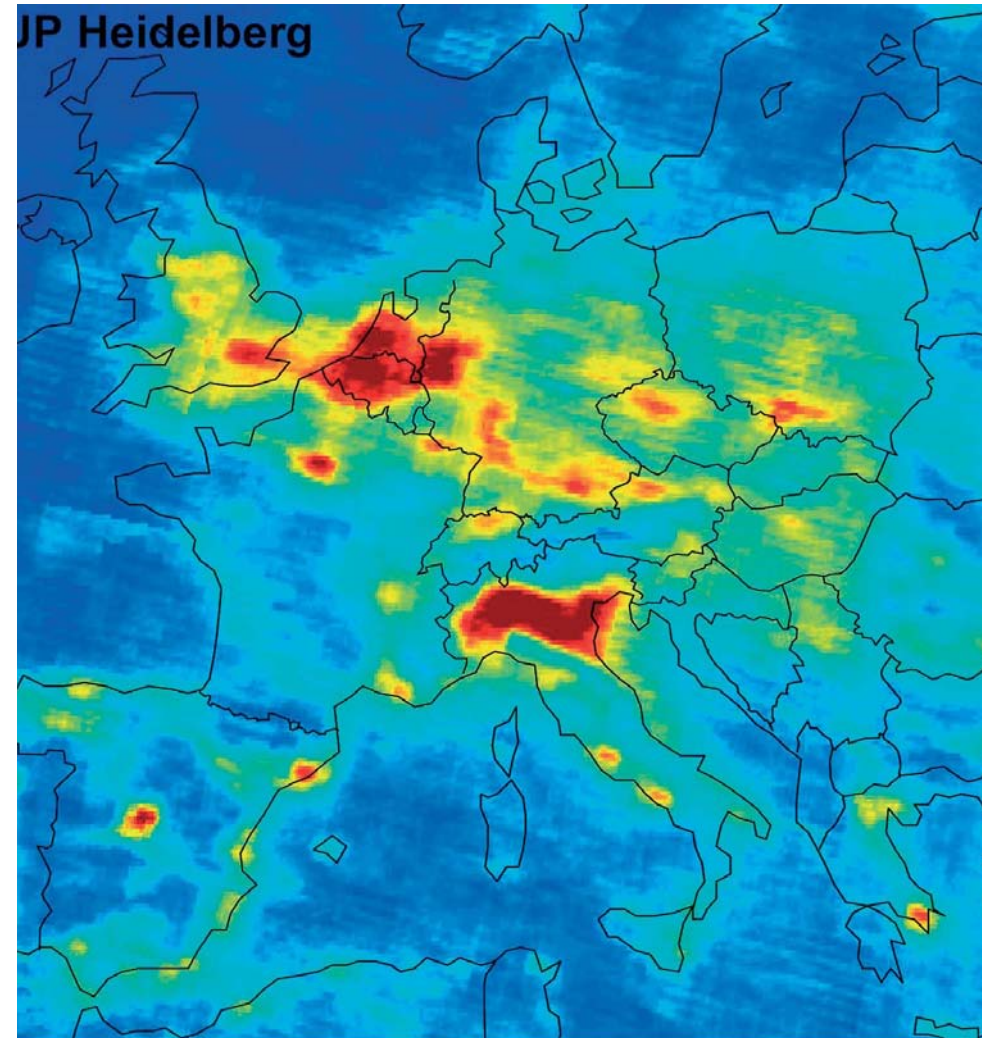
En lo referente a la posible explotación de los recursos del Ártico y al estudio de los efectos del cambio climático allí, recordemos que España fue admitida como país observador en el Consejo Ártico en el 2006 y que el buque oceanográfico *Hespérides* ha realizado, por primera vez, una campaña en el Ártico durante el 2007. Por otra parte, los diferentes países limítrofes (Canadá, Dinamarca, Noruega, Rusia, EEUU) se aprestan a asegurar sus derechos territoriales, en una complicada negociación.

Si todo eso está ocurriendo en el Ártico, que presenta unos grandes problemas de explotación de sus recursos naturales, ¿qué pasará en la Antártida cuando se abra la veda para las reclamaciones territoriales o para extraer los depósitos minerales? ¿Será capaz el Tratado Antártico de proteger a este continente?



■ Imágenes tomadas por el instrumento Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E), del satélite de NASA Aqua. Las líneas naranjas representan las medias durante 25 años (1978-2002), en los meses de septiembre y noviembre.

La contaminación vista desde el espacio: la visión global



■ Basado en 18 meses de observaciones del Envisat, este mapa atmosférico de alta resolución de la polución por dióxido de carbono deja en evidencia cómo las actividades humanas afectan a la calidad del aire, mostrando la contaminación atmosférica presente en Europa. Las zonas más rojas corresponden a las concentraciones más altas de dióxido de carbono. Aparecen justamente donde hay mayor concentración de población y/o industrias. ¿Dónde está la calidad de vida?



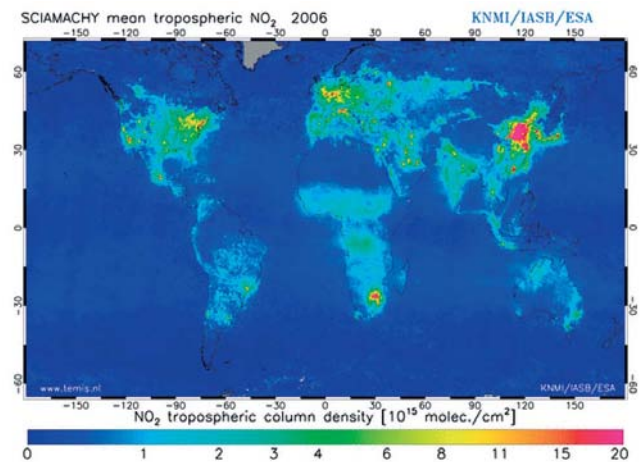
■ Fotocomposición de la Tierra, vista de noche. Créditos: NASA, Earth Observatory.

La Astronomía, la contaminación lumínica y la degradación del planeta

Existen unas 6000 estrellas visibles a simple vista. O existían... la contaminación lumínica debida a las luces de ciudades ha reducido ese número a unas pocas docenas. Por no hablar de otras fuentes contaminantes, mucho más perniciosas para la salud. Y para la Tierra.

Para los astrónomos *amateurs* y profesionales es un tema verdaderamente preocupante. Desde muchos observatorios es posible apreciar la contaminación causada por ciudades que se encuentran a decenas de kilómetros. Esta luz proporciona un fondo que reduce la calidad de las observaciones, pero también añade señales ficticias a los espectros, líneas de emisión que eliminan la información original que nos llega de la estrella o galaxia. En diferentes observatorios existen iniciativas para evitar o atenuar este problema (por ejemplo, en el Instituto de Astrofísica de Canarias, mediante su oficina técnica para la protección de la calidad del cielo o la reciente iniciativa de la Junta de Andalucía).

Para los amantes de la belleza que nos regala el Universo, es lamentable que haya que irse a un sitio remoto para poder disfrutar de este espectáculo (como el observatorio de La Silla). La mayoría de los habitantes del planeta ya



■ El mundo y la contaminación por NO_2 , esencialmente producida por la actividad industrial descontrolada, visto por ENVISAT. La imagen, generada por datos tomados con este satélite y su instrumento SCIAMACHY, muestra las concentraciones de dióxido de nitrógeno. Sorprende, aunque no tanto, que la mayor contaminación, tanto en área como en concentración, esté en China. Créditos: ESA.

no saben cómo es el verdadero cielo nocturno. Sin embargo, ese no es el verdadero problema. Para los seres humanos en general, es mucho más preocupante el futuro del planeta, que también es el nuestro.

La mayor parte de esa contaminación lumínica se emite de manera totalmente inútil. Son luces de iluminación de calle que se lanzan directamente hacia arriba, que no cumplen su función y representan un gasto sin sentido. Son dispositivos eléctricos encendidos cuando no hay un ser humano en las proximidades. Pantallas de ordenadores conectadas, televisores funcionando cuando no hay nadie en la sala, aires acondicionados a 18 grados en verano, calefacción al máximo, utilizando como regulador una ventana abierta... son múltiples los ejemplos. Apagar uno solo es una acción individual que de ejecutarse de manera global implicaría ahorrar gran cantidad de energía.

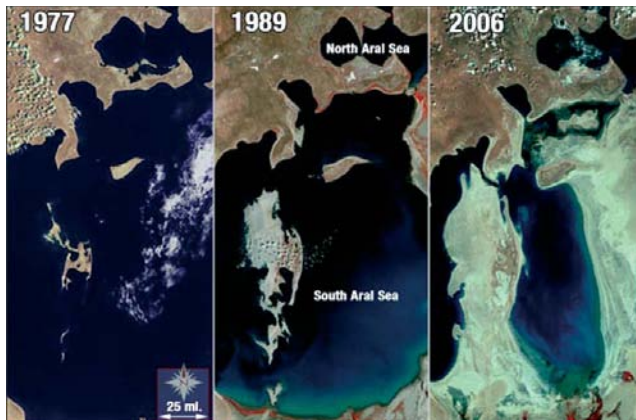
En definitiva, con independencia de la responsabilidad de gobiernos y grandes corporaciones, son las pequeñas decisiones personales las que son de más fácil implementación, las que dependen directamente de nosotros como individuos. Practiquémoslas. El planeta, y nuestra propia calidad de vida, nos lo agradecerá.

Desastres ecológicos desde el espacio: el mar de Aral

El mar de Aral, no hace mucho uno de los lagos más grandes del planeta (ocupaba el cuarto lugar) agoniza en directo ante nuestros atónitos ojos. Desde la superficie, la orilla ha retrocedido en las últimas décadas decenas, centenares de kilómetros, dejando varados innumerables barcos y convirtiendo a pueblos

y puertos en estructuras fantasmas. Desde órbita, la secuencia de imágenes tomadas en los últimos 30 años nos muestra la triste realidad.

Pequeñas islas se transforman en gigantescas entidades, para terminar por unirse al continente en una península de considerable tamaño. El fondo de gran parte del lago se revela, insinuándose bajo las poco profundas aguas, unas de las más contaminadas del planeta.



■ Créditos: USGS/Lansat.



■ Créditos: Aqua/MODIS.

La financiación del Banco Mundial ha permitido salvar una pequeña parte del mismo, localizada en el norte, mediante la construcción de una presa de 13 kilómetros de longitud que mantiene el agua aportada por el río Syr Darya, uno de los grandes tributarios del mar de Aral, dentro del nuevo lago, que se encuentra mucho menos contaminado que su homólogo y dentro de poco extinto vecino del sur.

Sí, una gran tragedia ecológica y humana debida a una planificación desastrosa y una nefasta gestión de los recursos naturales. Esperemos que al menos la memoria del mar de Aral nos sirva para aprender la lección.

Vigilando desastres ecológicos: el caso del petrolero *Prestige*

La red de satélites que orbita en torno a nuestro planeta cumple numerosas funciones. Entre ellas, destaca la respuesta rápida a desastres naturales o provocados por la actividad industrial. La Carta Internacional sobre el Espacio y las Grandes Catástrofes, firmada hace ya más de 10 años, tiene como objetivo paliar sus efectos poniendo a disposición de los afectados los recursos necesarios para la observación de los mismos desde el espacio.

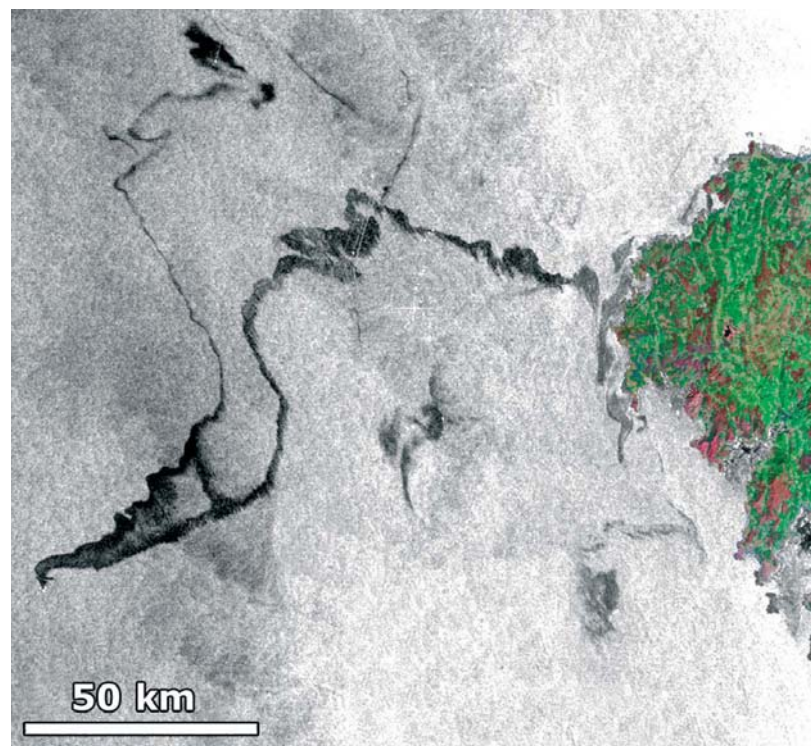
Uno de los ejemplos más claros de los últimos años sucedió con el petrolero *Prestige*. Una serie de accidentes, equívocos y decisiones desafortunadas causaron que una brecha en el casco de este buque provocara una inmensa marea negra que afectó a las costas españolas y francesas, desde Galicia hasta las Landas. El *Prestige* se hundió el 19 de noviembre de 2002, a unos 250 km de la costa noroeste española, liberando varias decenas de miles de toneladas de crudo y produciendo un inmenso desastre ecológico.

Las imágenes tomadas con Envisat, un satélite de la Agencia Espacial Europea, permitieron realizar un seguimiento de la marea negra y determinar las zonas de mayor riesgo, con la intención de limitar el impacto y las consecuencias ecológicas y económicas.

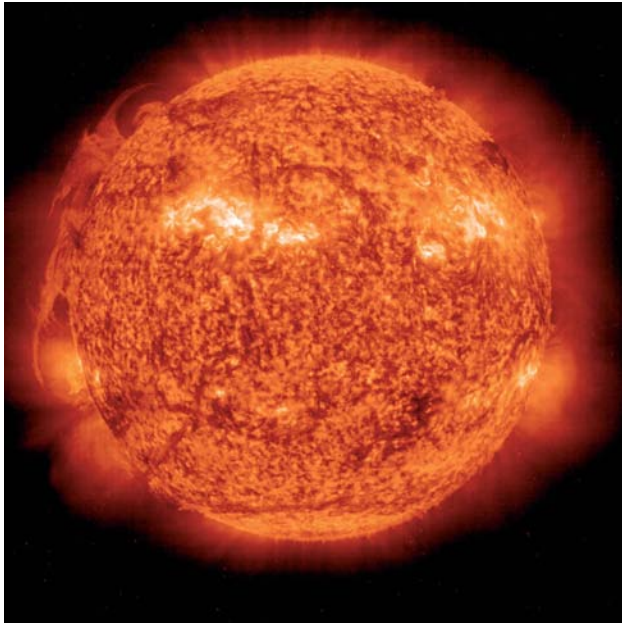
Con objeto de optimizar los recursos disponibles por las diferentes agencias espaciales, en 1999 se firmó un acuerdo entre la ESA y CNES, la Agencia Espacial Francesa, denominado «Carta Internacional sobre el Espacio y las Grandes Catástrofes». Posteriormente se han unido la Agencia Espacial Canadiense (CSA), la Administración Nacional de Océanos y Atmósfera del Departamento de Comercio de EEUU (NOAA), la Organización de Investi-

gación Espacial India (ISRO), la Agencia Espacial Argentina (CONAE - Comisión Nacional de Actividades Espaciales), la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), el Centro Espacial Nacional Británico (BNSC/DMCii) y, finalmente, la Administración Nacional Espacial de China (CNSA).

Todas estas agencias han puesto a disposición de los afectados por catástrofes, independientemente de su origen, los recursos espaciales que controlan, para paliar en la medida de lo posible sus efectos. Un loable ejemplo de colaboración internacional que, lamentablemente, no se emula con la suficiente frecuencia.



■ Fotografía tomada con ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), un instrumento a bordo del satélite Envisat, de la ESA. Este tipo de herramientas permitió realizar un seguimiento de la marea negra y determinar las zonas de mayor riesgo, con la intención de limitar el impacto y las consecuencias ecológicas y económicas.



Parte IV

La Tierra en el Sistema Solar

■ El Sol. Imagen proporcionada por la misión SOHO.

El Sistema Solar

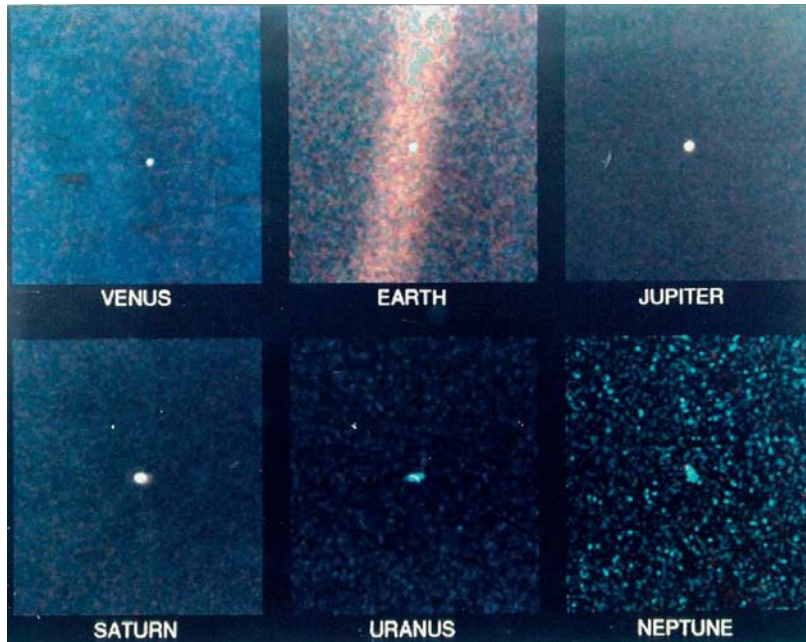
Desde que Galileo Galilei apuntara su rudimentario telescopio hacia la esfera celeste por primera vez en 1609, descubriendo entre otros fenómenos los cuatro principales satélites de Júpiter, el relieve lunar y, sin percatarse de ello, el planeta Neptuno y los anillos de Saturno, mucho ha cambiado en nuestra visión del Sistema Solar. Ha sido una apasionante aventura la que nos ha permitido conocer la verdadera escala de distancias, mediante la estimación de la distancia que media entre la Tierra y el Sol, el verdadero tamaño de nuestro planeta y la diversidad de objetos en nuestro sistema planetario.



■ Los cuatro planetas interiores del Sistema Solar, en cuya composición dominan materiales relativamente densos y que por tanto tienen una superficie sólida. Los tamaños respectivos guardan las proporciones correctas. Imágenes de las misiones Messenger, Venus Express, Apollo XVII y HST.

Probablemente, la revolución posterior más importante comienza con las misiones espaciales, que nos han permitido realizar una verdadera exploración, superficial todavía, desde las proximidades de todos los cuerpos principales y algunos de menor tamaño.

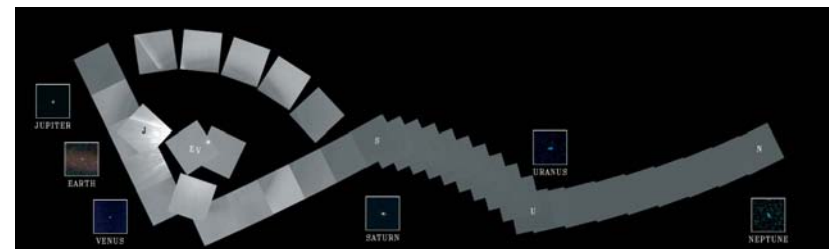
Una de las misiones espaciales de mayor éxito ha sido el programa Voyager, formado por dos sondas lanzadas el 20 de agosto y el 5 de septiembre de 1977 y que han sobrevolado las proximidades de los planetas exteriores del Sistema Solar: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, proporcionándonos miles de fotografías y medidas de los mismos y sus respectivos sistemas de satélites. A punto de terminar su vida útil, la Voyager I realizó una secuencia de fotos del Sistema Solar en diferentes filtros, desde su región más interna, incluida el Sol, hasta Neptuno. Aunque en la misma no se puede apreciar Mercurio, por estar demasiado cerca de nuestra estrella, o Marte, por coincidir con zona de la óptica de la cámara con demasiada luz difusa. En cualquier caso, un documento gráfico único.



■ Seis imágenes tomadas por la sonda Voyager I cuando se acercaba al final de su misión, en los confines del Sistema Solar (a 6400 millones de kilómetros) y bastante por encima del plano de la eclíptica, en el que orbitan los planetas. Cada una de estas fotografías, correspondientes a los planetas Venus, la Tierra, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, ha sido generada a partir de tres diferentes tomas con distintos filtros (violeta, azul y verde), lo que permite reproducir los colores aproximados. Créditos: NASA.

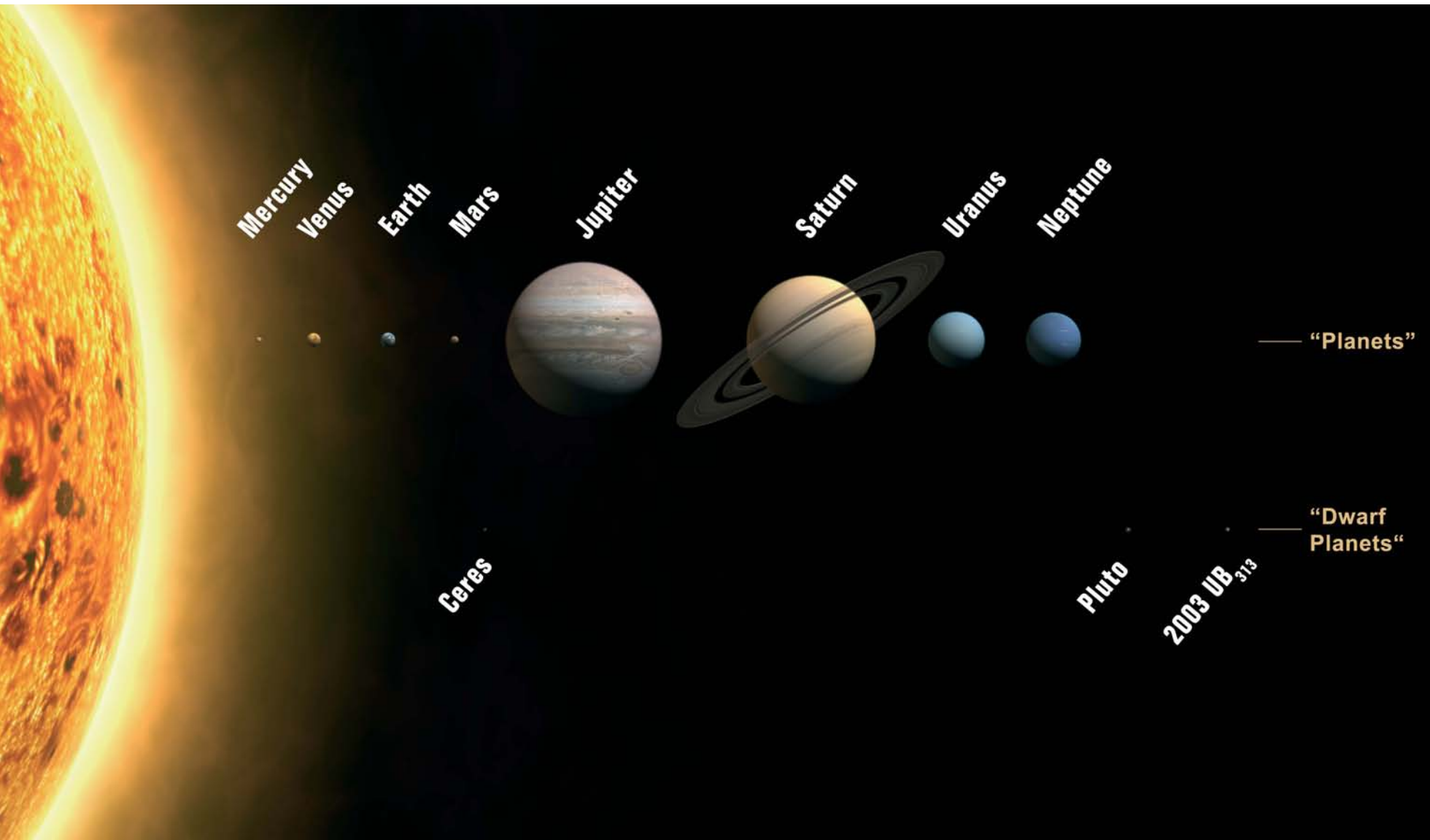


■ El Sistema Solar, con sus ocho planetas: los rocosos Mercurio, Venus, la Tierra, Marte (apenas apreciables en la imagen); y los gaseosos Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Los tamaños relativos conservan las proporciones reales, aunque no es el caso del Sol, que debería ser algo más grande. Imágenes de las misiones SOHO, Messenger, Venus Express, Apollo XVII, HST y Voyager.



■ El Sistema Solar, visto por la sonda Voyager I el 14 de febrero de 1990, al final de su etapa útil. Incluso desde la estrella más cercana, Próxima Centauri, sería imposible distinguir nuestro sistema planetario en este retrato de familia. Solo técnicas sofisticadas (tales como espectroscopia de precisión, variabilidad fotométrica, astrometría, óptica adaptativa) podrían proporcionar una visión veraz de la complejidad del mismo.

¿Qué es un planeta?



■ Los planetas del Sistema Solar según la nueva definición de la IAU, y los tres planetas enanos. Créditos: IAU.

El 24 de agosto de 2006, la Unión Astronómica Internacional (IAU), después de evaluar las diferentes propuestas presentadas en su reunión plenaria, decidió adoptar oficialmente una definición de planeta y de los otros cuerpos del Sistema Solar, según la cual:

1.- Es un planeta aquel objeto que: a) orbita alrededor del Sol; b) posee suficiente masa como para que su propia gravedad domine las fuerzas presentes como cuerpo rígido, se encuentra en equilibrio hidrostático y por tanto adopta una forma aproximadamente redondeada; c) y es el objeto claramente dominante en su vecindad, habiendo limpiado su órbita.

2.- Es un planeta enano aquel objeto que: a) orbita alrededor del Sol; b) posee suficiente masa como para que su propia gravedad domine las fuerzas presentes como cuerpo rígido, se encuentra en equilibrio hidrostático y por tanto adopta una forma aproximadamente redondeada; c) no ha limpiado su órbita de otros objetos; d) no es un satélite de otro planeta.

3.- Cualquier otro objeto, excepto un satélite, se debe denominar pequeño cuerpo del Sistema Solar, incluyendo la mayor parte de los objetos transneptunianos.

Por tanto, dentro del Sistema Solar, solo existen ocho planetas (Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno). Plutón, Ceres y Eris (recientemente descubierto y también conocido como 2003 UB313) pasan a ser planetas enanos. En particular, Plutón pierde su estatus de planeta debido a varias características, entre las que se hallan: su órbita, altamente elíptica y fuera del plano de la eclíptica; la presencia de un compañero, Caronte (descubierto en 1978), de tamaño y masa del mismo orden de magnitud, y la compañía de otros dos objetos de menor masa (Nix e Hydra, avisados por primera vez en el año 2005). Así, Plutón no cumple la condición 2c de la definición oficial de la IAU.

Por otra parte, Plutón y Eris, localizados más allá de la órbita de Neptuno, pertenecerían a una nueva categoría de objetos, los plutoides, de los cuales se espera encontrar varias decenas durante los próximos años.

Los ya más de 300 exoplanetas descubiertos desde el año 1995 (incluso antes, si se incluyen los que orbitan alrededor de estrellas de neutrones) no están afectados por esta definición. Para ellos, la IAU acordó en el año 2003 una definición provisional, insatisfactoria para muchos especialistas y que

está sujeta a revisión. Así, un exoplaneta se caracteriza por orbitar alrededor de una estrella o remanente de estrella (enana blanca, estrella de neutrones) y tener una masa inferior a 13 masas de Júpiter. Esto es, no fusiona deuterio, un isótopo de hidrógeno, ni cualquier otro elemento químico. Por tanto, no produce energía a partir de este tipo de fuente.

Los objetos subestelares, con masas superiores a las de los exoplanetas pero inferiores a un 8% aproximadamente de la masa del Sol, se denominan enanas marrones. Se caracterizan por la ausencia de fusión de hidrógeno.

Los objetos aislados de masa planetaria (IPMOs por sus siglas en inglés, o planemos, o xebarcos, u oriones), con masa por debajo del límite de las 13 masas de Júpiter, se deben denominar sub-enanas marrones o cualquier otro nombre que sea apropiado, salvo el de planeta.

Exoplanetas: La zona de habitabilidad y la búsqueda de vida más allá del Sistema Solar

«Yo puedo imaginar un infinito número de mundos parecidos a la Tierra, con un jardín del Edén en cada uno». Lo afirmaba Giordano Bruno a finales del siglo XVI, antes de ser quemado por orden de la Inquisición Romana. Desde luego, no es en nuestro planeta donde se puede encontrar el Paraíso. Aquí ya no, si es que existió una Edad de Oro. Pero tal vez exista más allá. Los astrónomos y exobiólogos seguimos empeñados en buscar vida en el Universo, y uno de los conceptos que manejamos es el de «zona de habitabilidad».

Desde los glaciares vientos de la meseta antártica a la sofocante humedad cálida del Trópico o la aridez ardiente del Sahara; desde la negrura de las más profundas simas abisales a las resplandecientes cumbres nevadas de los techos del mundo; en volcanes o en medios tan ácidos como los de Río Tinto. Sí, la vida, en sus diversas formas, abunda, medra, en ocasiones domina. Cambian las condiciones físicas y químicas, pero aun así siempre hay un nicho cubierto por un conjunto de especies. Pero la Tierra, con toda su variedad, solo cubre un exiguo rango de temperaturas y presiones o de niveles de radiación. La temperatura más baja registrada en la Antártida puede rondar los -89,4 grados centígrados, y el valor más alto medido en el desierto más caliente rondará los +58 grados. Esto es, un rango de unos 150 grados. La mayor parte del planeta tiene unas oscilaciones mucho más reducidas. En Madrid, ya de por sí extremo al tener clima continental, son unos 50 grados de diferencia entre el día más frío y el más caluroso del año.

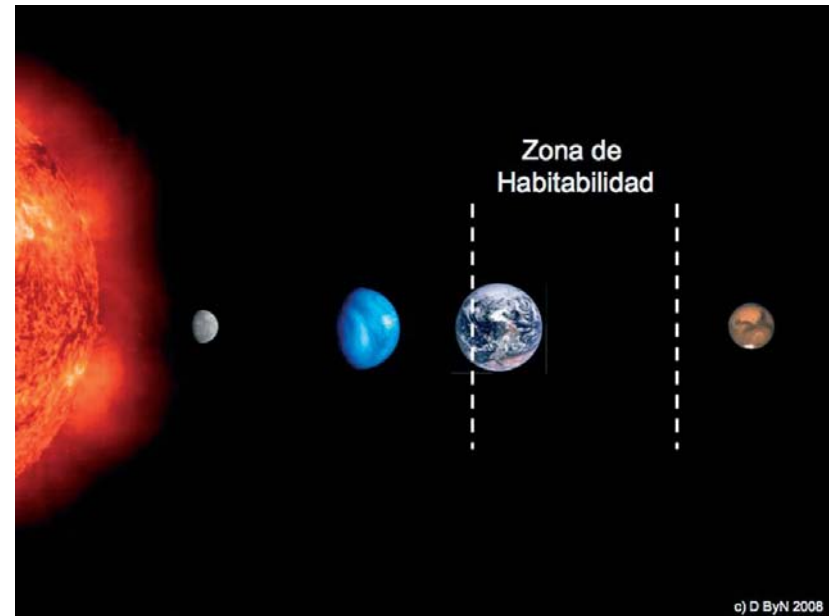
El clima terrestre depende, entre otros factores, de uno esencial: el Sol y de la cantidad de energía que de él recibimos. Esto es, depende de la energía que irradia nuestra estrella (unos $3,65 \times 10^{23}$ kilovatios) y la que llega a la Tierra (la denominada constante solar, 1366 vatios por metro cuadrado), que depende de la distancia entre la Tierra y el Sol y de la sección eficaz de la Tierra (el área que «ve» el Sol). Esta cantidad de energía es esencial para que el agua se encuentre en estado líquido. Así, Marte, que se encuentra a una distancia mayor del Sol (1,52 veces la distancia media entre el Sol y la Tierra, o unidades astronómicas), recibe solo un 43% de la energía que llega a nuestro planeta por metro cuadrado (depende matemáticamente del inverso del cuadrado de la distancia). Por tanto, de haber agua en Marte, se encontraría preferentemente en estado sólido, ya que la temperatura media de la Tierra es de unos +10 grados centígrados (por encima del punto de fusión del hielo), cuando la de Marte es de unos -63 grados centígrados. Pero, insistimos, la variación en un planeta puede ser muy grande (en el caso de Marte, entre -140 y +20 grados centígrados). Otro ejemplo lo proporciona Venus, más cerca del Sol que la Tierra, y con una temperatura media de +465 grados centígrados. Como contraejemplo está Mercurio, cuya temperatura superficial, unos +167 grados centígrados, es inferior a la de Venus, a pesar de estar mucho más cerca del Sol. Y es que la composición química de la atmósfera de un planeta (Mercurio tiene una muy tenue) es tremendamente importante.

La zona de habitabilidad en el Sistema Solar

La zona de habitabilidad alrededor de una estrella se define como el rango de distancias orbitales en donde un planeta de tipo terrestre podría contener agua líquida. Este fenómeno implica que se asume que el agua es indispensable para la aparición de la vida, lo cual no tiene por qué ser rigurosamente cierto.

La zona de habitabilidad depende de dos factores: la masa de la estrella y su edad, ya que al evolucionar, una estrella cambia su tipo espectral y su luminosidad. El límite inferior de la zona de habitabilidad se estima a partir de la fotodisociación de agua. Esto es, cuando la radiación solar es tan intensa que el agua se descompone en sus elementos básicos, oxígeno e hidrógeno, y este último escapa del planeta al no poder ser retenido por el campo gravitacional. En buena medida arbitrariamente, se estima que la radiación requerida es 1,1 veces la constante solar ($1,1 \times 1,366$ vatios/m²). En el Sistema Solar, ello equivale a 0,95 unidades astronómicas. El límite superior de la zona de habitabilidad lo impone la condensación de dióxido de

carbono (CO₂). Una estimación conservadora indica que ello ocurre a un valor de 0,53 veces la constante solar. Nuevamente, en el Sistema Solar, esto equivale a 1,37 unidades astronómicas.



■ La zona de habitabilidad actual en el Sistema Solar. Las distancias están escaladas de manera lineal, al igual que los tamaños relativos de los planetas interiores. Sin embargo, el tamaño proporcional del Sol sería mucho más grande, y los diámetros de los planetas no guardan proporcionalidad con sus distancias al Sol. Imágenes de SOHO, Messenger, Venus Express, Apollo XVII y HST. Llegará un momento en el que el Sol, al continuar con su evolución, aumentará tanto su luminosidad como para que nuestro planeta se encuentre fuera de la zona de habitabilidad del Sistema Solar. La temperatura será tan alta que el agua se evaporará y los océanos se vaciarán.

Como hemos dicho en el párrafo anterior, las estrellas evolucionan y su luminosidad cambia. Por ello, se ha definido el concepto de «zona de habitabilidad continuada» (ZHC), que representa el rango de distancias orbitales para las cuales la constante solar se mantiene dentro de estos límites (1,1-0,53) durante una parte significativa de la historia de una estrella. Dado que el Sol aumenta lentamente su luminosidad, en el Sistema Solar la ZHC

se localiza entre 0,95 y 1,15 unidades astronómicas. Por tanto, es en este rango de distancias orbitales donde, en principio, se debe buscar agua líquida y, por tanto, vida. Al menos tal y como la conocemos.

Otras estrellas

La zona de habitabilidad alrededor de otras estrellas se define de manera análoga. Basta con comparar la luminosidad de la estrella con la del Sol para calcular la distancia media de esta región, según:

Distancia (ZH, estrella) = $[Luminosidad (estrella) / Luminosidad (Sol)]^{0.5}$, en unidades astronómicas.

Para calcular el radio mínimo y máximo de su zona de habitabilidad, basta con multiplicar Distancia (ZH, estrella) por los factores 0,95 y 1,37, respectivamente.

Así, en una estrella de tipo M, el tipo espectral más numeroso en nuestra galaxia, de baja masa y luminosidad, la zona de habitabilidad se encuentra muy cerca del astro central. De hecho, está tan próxima que un hipotético planeta localizado en dicha órbita se encontraría con un periodo de rotación igual al de revolución, debido al efecto marea, al igual que le sucede a la Luna con la Tierra. Este es el caso del sistema planetario múltiple asociado a la estrella Gliese 581 y del planeta recientemente descubierto por un equipo europeo (Gl581c), que podría tener una masa de alrededor de cinco veces la masa de la Tierra. Su distancia a la estrella central, de tipo espectral M3, es de 0,073 unidades astronómicas, y se especula que Gl581c podría contener agua en estado líquido. Es de suponer que este caso no sea único y misiones espaciales como Corot y Kepler, y en el futuro Darwin (o su sucesor), descubran numerosos sistemas como este.

Organismos extremófilos

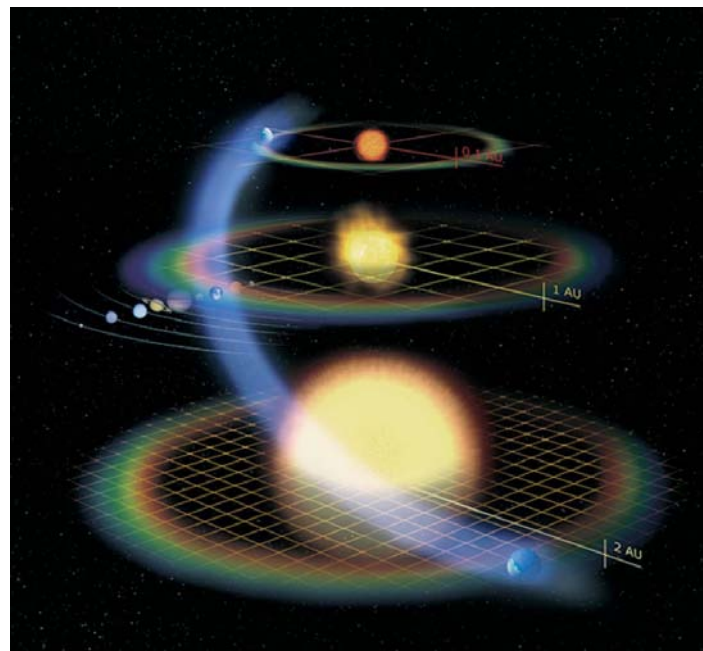
Aun cuando el concepto de zona de habitabilidad nos sirve para buscar exoplanetas que pudieran albergar vida, siempre hemos de tener en cuenta dos factores: el primero es que la Naturaleza siempre nos sorprende. Históricamente, la búsqueda de sistemas planetarios ha estado ligada a nuestra percepción del Sistema Solar, siempre ha sido utilizado como modelo básico. Sin embargo, desde el descubrimiento del primer exoplaneta, ha quedado claro la gran variedad de escenarios, incluyendo estrellas de muy baja temperatura superficial con planetas similares a la Tierra en órbitas muy cercanas, aunque dentro de la zona de habitabilidad. Incluso la

presencia de planetas en torno a estrellas dobles o alrededor de estrellas evolucionadas, las gigantes rojas.

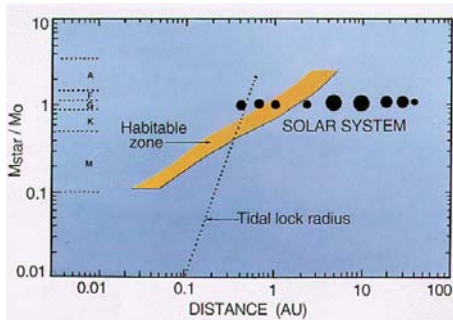
Por otra parte, en nuestro mismo planeta encontramos vida en ecosistemas verdaderamente alienígenas, que no dependen de la energía solar para su desarrollo. Es este el caso de los organismos extremófilos, que viven en parajes insospechados, tales como medios extremadamente ácidos (como es el caso de Río Tinto); o en las proximidades de volcanes, a muy altas temperaturas.

Por tanto, no debemos olvidar que la constante solar solo es un valor indicativo para la búsqueda de vida, y que esta no tiene por qué desarrollarse a partir de un medio acuático. El metano podría jugar un papel análogo al agua, como ocurre en la hidrología de Titán. Por otra parte, otras bioquímicas, distintas a las del carbono, aunque improbables, podrían ser viables.

La búsqueda continúa...



■ La dependencia de la zona de habitabilidad con la luminosidad de la estrella central.



■ Gráfico tomado de *The Encyclopedia of Astrobiology, Astronomy and Spaceflight*, que muestra la localización de la zona de habitabilidad (franja anaranjada) en función de la masa estelar y de la distancia a la estrella. La equivalencia con los tipos espectrales (G2 en el caso del Sol) se muestra a la izquierda. También aparecen en la figura los ocho planetas del Sistema Solar y el planeta enano Plutón (sus tamaños no están a escala). Créditos: Tarter *et al.*, 2007.

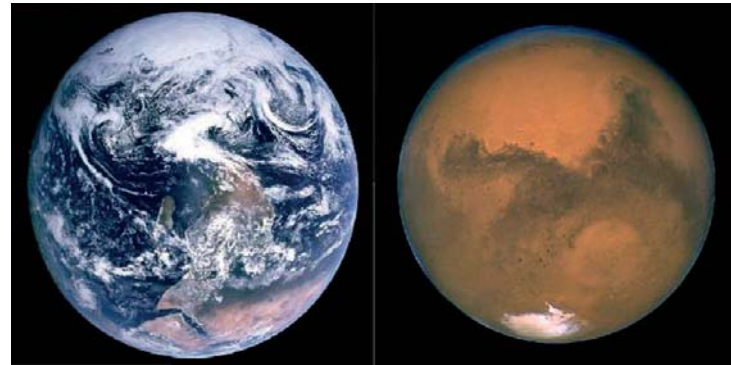
La Tierra y Marte: ¿gemelos o hermanastros?

La exploración intensiva a la que se está sometiendo el planeta Marte nos está revelando gran cantidad de datos sobre sus propiedades y sobre su pasado. Sin embargo, existen dos grandes incógnitas por desvelar: ¿cuáles fueron las diferencias que provocaron que el planeta sea tan distinto de la Tierra? ¿Existe o ha existido actividad biológica en el planeta rojo? Especialmente revelador es el estudio comparativo de ambos planetas.

Desde la distancia, la Tierra y Marte nos muestran profundas diferencias. En el primer caso, dominan blancos y azules, correspondientes a las nubes y a los océanos, y los marrones de los continentes. Por tanto, la existencia de agua en sus diferentes estados (sólido en los casquetes polares, líquido en los mares y gaseoso en la atmósfera) es evidente. Y la presencia de agua sugiere, de manera casi inmediata, la existencia de vida. De hecho, incluso desde satélites en órbita es posible apreciar la intensa actividad biológica del planeta, como es el caso de las banquisas antárticas o el cambio estacional de la superficie forestal.

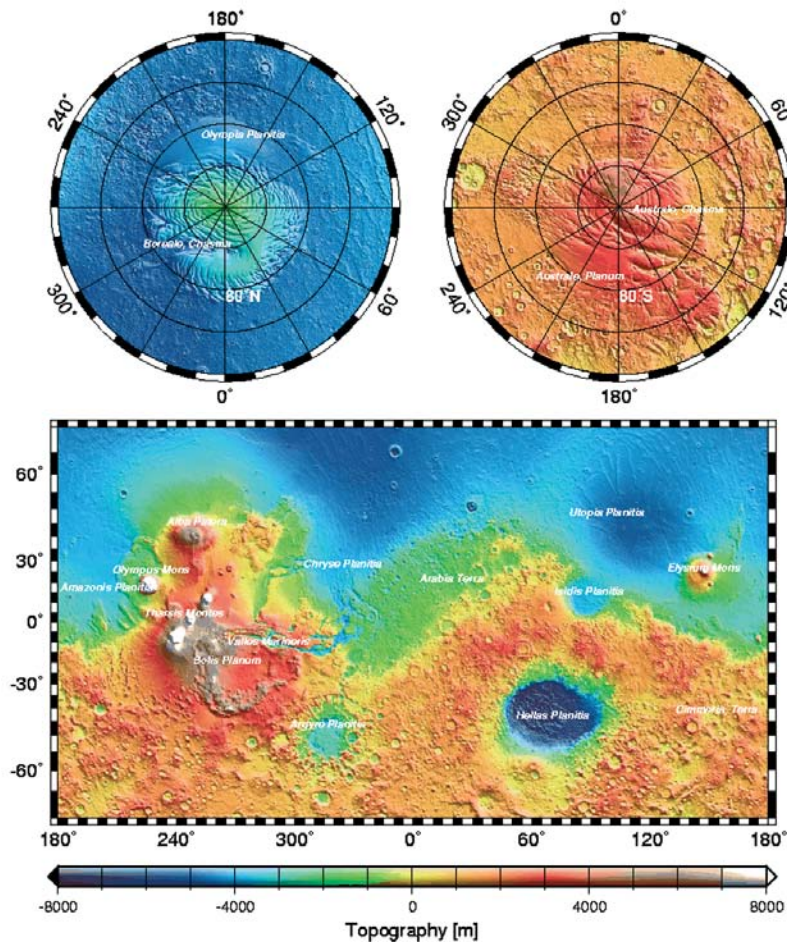
Marte es bien distinto. Diversas tonalidades naranjas, provocadas por óxidos de hierro, dominan su superficie. Dependiendo de la estación y de la posición relativa con la Tierra, algún polo puede ser visible, aunque en esta ocasión el blanco proviene esencialmente de hielo seco (dióxido de carbono

en forma sólida). Sin embargo, durante los últimos años, diversos estudios han dejado claro que existe agua en la superficie marciana, y que la dinámica de este compuesto es bastante compleja.



■ La Tierra (la primera fotografía completa del planeta, tomada desde la Apollo XVII, con la Antártida en la parte superior) y Marte (imagen del HST). Nótese que no están a escala, ya que Marte es considerablemente más pequeño que nuestro planeta (los diámetros ecuatoriales son, respectivamente, 12 756,28 y 6794,4 kilómetros).

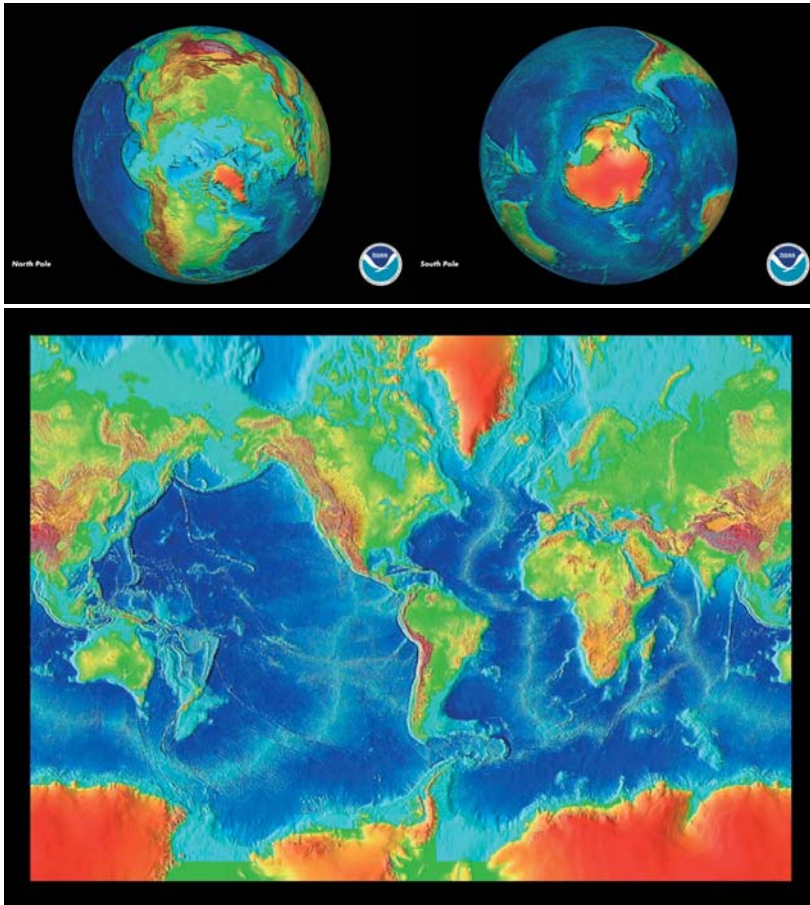
Marte tiene una tenue atmósfera, compuesta esencialmente de dióxido de carbono (95,3%), nitrógeno (2,7%), argón (1,4%) y unas trazas de oxígeno (0,13%). La de la Tierra, por el contrario, está compuesta esencialmente de nitrógeno (78,1%), oxígeno (20,94%), argón (0,93%) y una cantidad variable de dióxido de carbono (alrededor del 0,035%, incrementándose rápidamente). Las temperaturas medias varían en gran medida: -55 grados centígrados (°C) en el caso de Marte, con mínimas del orden de -133 °C y máximas de unos +27 °C; y de una media de unos +15 °C en el caso de la Tierra, con mínimas de -89,4 °C (en Vostok, Antártida) y máximas de +58 °C (en El Azizza, en Libia). Sin embargo, la temperatura media de la Tierra está afectada por el efecto invernadero provocado por los gases de la atmósfera, principalmente el dióxido de carbono, el vapor de agua, el ozono (moléculas de oxígeno con tres átomos, en vez de los dos que tiene el oxígeno que respiramos) y el metano. De no ser así, la temperatura media sería unos 33 °C más baja, alrededor de los -18 °C, y por lo tanto el agua estaría en estado sólido en la mayor parte del planeta.



■ Diagrama con la topografía de Marte, cuyas alturas mínimas (azul intenso) y máximas (rojos-blancos) se encuentran en un rango de 16 kilómetros. Nótese que el Monte Olimpo, el más alto del Sistema Solar, se eleva 21 kilómetros sobre el nivel en el cual la presión de la atmósfera es 6,1 milibares (la presión a la cual se localiza el triple punto del agua), y que se denomina datum de Marte (el equivalente al nivel del mar en la Tierra). Dado que el punto más bajo se encuentra en Hellas Planitia (un antiguo cráter de impacto), a unos 7 kilómetros por debajo del datum marciano, la diferencia es de unos 28 kilómetros, bastante superior a los 19 kilómetros que separan las profundidades de la fosa de las Marianas del Everest. Créditos: Mars Orbiter Laser Altimeter y NASA.

En los casos de Marte y la Tierra, la estructura interna se divide en tres regiones bien diferenciadas: corteza, manto y núcleo. Sin embargo, contrariamente al caso de la Tierra, el núcleo de Marte es sólido y no crea su propio campo magnético. Existen, eso sí, campos magnéticos locales, restos «fósiles» de un campo global que pudo existir como consecuencia de un núcleo parcialmente líquido, como en el caso terrestre. La práctica ausencia de tectónica de placas, tal y como la conocemos en la Tierra, que produce un vulcanismo muy activo y la orogénesis (los levantamientos de cadenas montañosas), implica que los terrenos marcianos son mucho más viejos que los lechos oceánicos o los continentes terrestres. Por ejemplo, la gran depresión del hemisferio Sur, Hellas Planitia, fue provocada por el impacto de un gran cuerpo celeste hace unos 3900 millones de años. En el caso de la Tierra, las evidencias sobre la corteza de un evento así habrían dejado de existir hace mucho tiempo.

En cualquier caso, la comparación de los perfiles en altura de ambos planetas muestra que ambos son bien distintos: mientras que la mayor parte de la masa continental terrestre se concentra en el hemisferio Norte, en donde por otra parte no existe un continente polar, en Marte el hemisferio septentrional está dominado por la depresión Vastitas Borealis, con una profundidad de miles de metros por debajo del datum marciano. Este se sitúa a la altura en la cual la presión de su atmósfera es de 6,1 milibares, donde se localiza el punto triple del agua, definido como el punto en el diagrama de fases (presión frente a temperatura) en el cual convive una sustancia en estado sólido, líquido y gaseoso de manera simultánea. En el caso del agua, los valores exactos son 273,16 K (0,01 °C) y a una presión de 6,1173 milibares. Por tanto, por debajo del datum marciano (como las profundidades de Hellas Planitia) sería posible encontrar agua líquida si la temperatura fuera lo suficientemente alta. Contrariamente a lo que sucede en Marte, el hemisferio Sur terrestre está dominado por océanos y mares, aunque varias masas continentales, que se alzan sobre el nivel del mar a alturas considerables (como es el caso de la meseta antártica) destacan sobre su perfil topográfico. La situación marciana es más uniforme. La mayor diferencia está en la gran cantidad de agua en estado sólido que se concentra en el Polo Sur terrestre. Este tiene una superficie de unos 14 millones de kilómetros cuadrados en verano, pero puede dilatarse, al incluir las banquisas, hasta los 30 millones. En contraposición, el tamaño que alcanza la Antártida marciana es mucho menor, de unos 140 000 kilómetros cuadrados, y su composición es muy distinta, ya que domina, como se ha dicho anteriormente, el hielo seco.



■ La superficie de la Tierra, en donde la altura está codificada con los distintos colores: azul para los fondos oceánicos y verdes, amarillos y rojos para los continentes. La profundidad más elevada, en las fosas marinas, es de unos 11 kilómetros bajo el nivel del mar (azul más intenso), mientras que los rojos más intensos denotan alturas de 5 kilómetros sobre el nivel del mar. La diferencia máxima de altura en nuestro planeta es de unos 19 kilómetros.

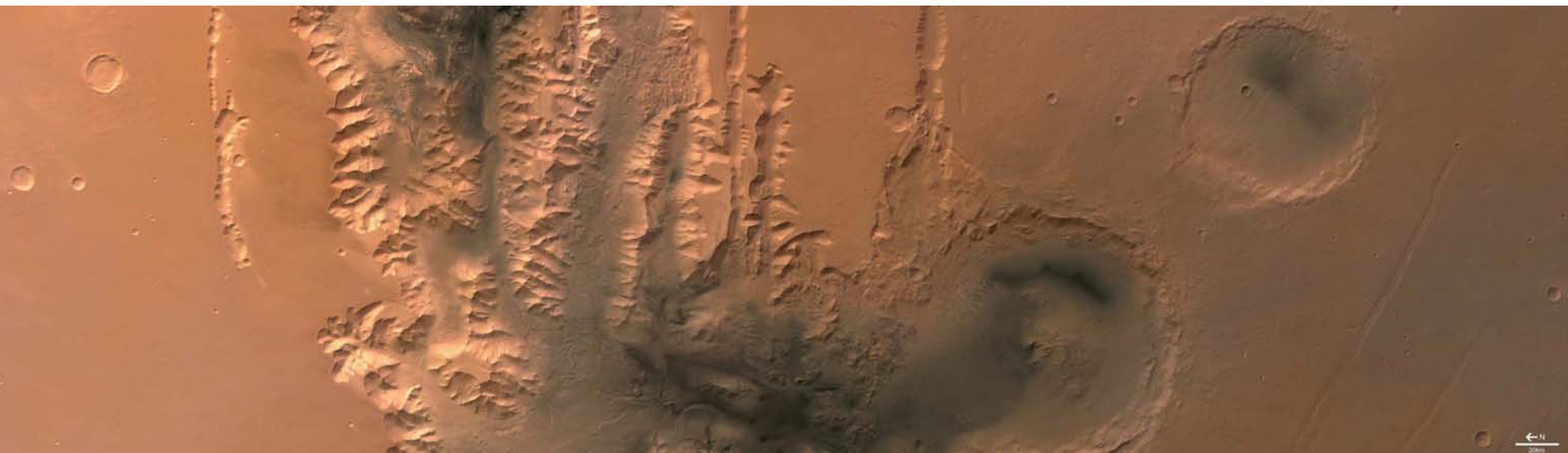
Curiosamente, en nuestra Antártida encontramos algunos de los mejores análogos marcianos, por sus bajas temperaturas y reducida humedad. Este es el caso del sistema de valles McMurdo, localizados muy cerca de la costa, que geológicamente pudieran tener contrapartidas en Marte. Si hay

vida o no, o si ha existido actividad biológica, es una cuestión que todavía está abierta. Hay estudios que indican que los terrenos marcianos serían demasiado salados para haber podido desarrollar vida. Sin embargo, en nuestro propio planeta existen numerosos ejemplos de seres vivos que se desarrollan en ambientes aparentemente hostiles, enmarcados bajo el nombre de organismos extremófilos.



■ Una comparación entre las llanuras árticas de Marte (arriba), en una reciente imagen tomada por la sonda americana Phoenix Mars Lander, y la terrestre (Spitsbergen, en el archipiélago de las Svalbard, Noruega, pero localizadas en el Ártico).

Son varias las naves que han aterrizado con éxito en la superficie de Marte. La más reciente, y la que lo ha hecho más al norte, ha sido la Phoenix Mars Lander. Sus imágenes nos revelan una llanura cubierta de formas poligonales que se asemejan a las presentes en regiones similares de la Tierra. Es permafrost, que se solidifica y se funde de manera estacional, clara evidencia de la presencia de agua en el planeta. La sonda Phoenix ha dispuesto de instrumentación adecuada para perforar y analizar estas estructuras,



■ La región en torno al Tithonium Chusma, en una imagen tomada por la sonda europea Mars Express.



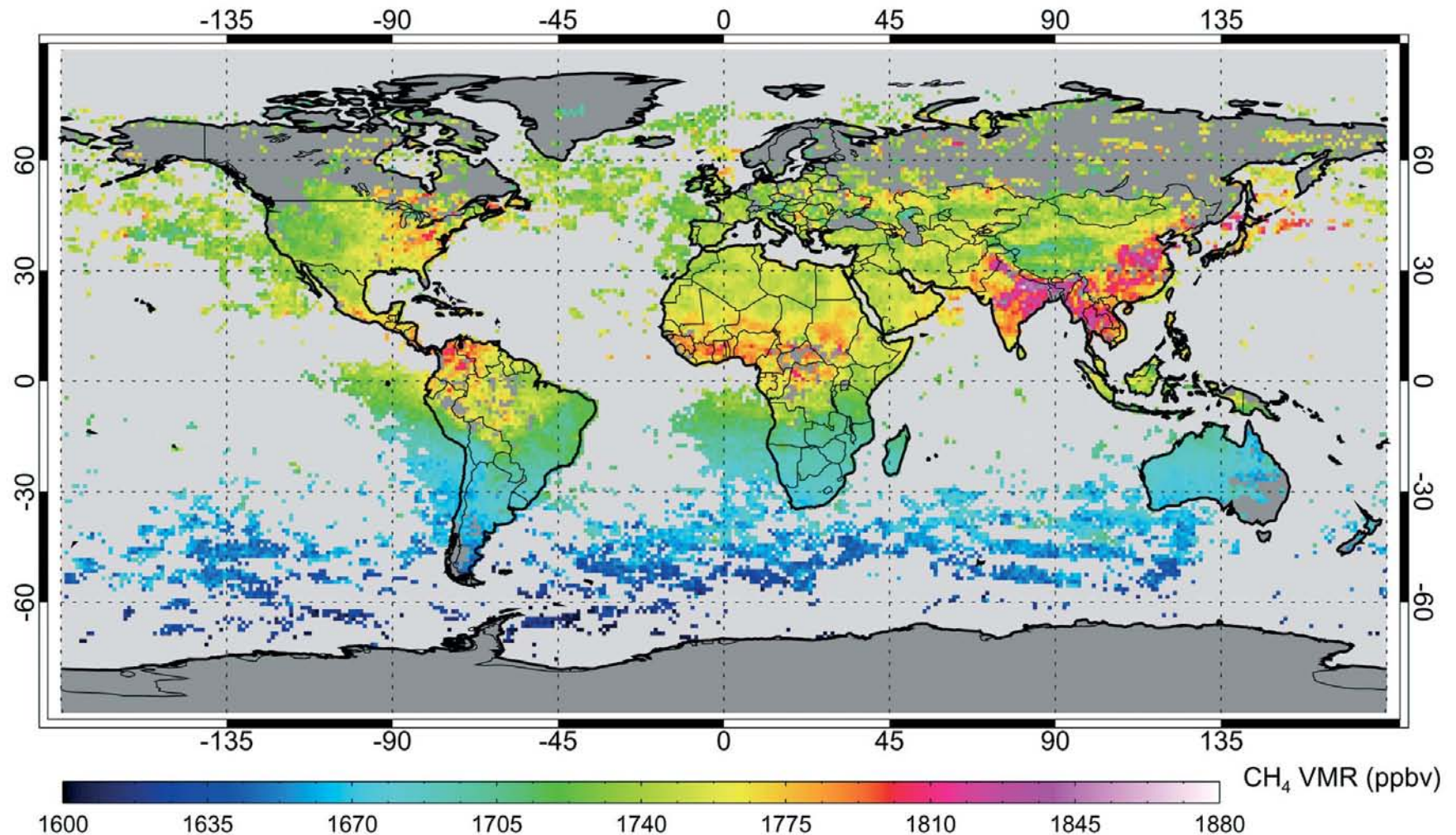
■ Los valles McMurdo, en la Antártida, cerca de la costa. Este sistema normalmente está libre de nieve y es extraordinariamente seco. Por tanto, podría asemejarse a determinadas áreas marcianas. Créditos: NASA, satélite Terra e instrumento ASTER.

incluyendo su composición química, para intentar verificar si algún compuesto orgánico (aunque no necesariamente biológico) está presente en las llanuras árticas de Marte. En cualquier caso, recordemos que al menos en la Tierra, hay seres vivos (los extremófilos), que pueden medrar en ambientes verdaderamente sorprendentes: desde medios ácidos hasta calderas volcánicas submarinas a grandes temperaturas. Como caso típico, el ecosistema de Río Tinto.

Sí, ambos planetas tienen interesantes similitudes y grandes diferencias. Podríamos clasificar a Marte como el hermano pobre de la Tierra. Sin embargo, apenas hemos arañado unos pocos sitios en su superficie. La mayor parte de sus secretos nos aguardan.

Biomarcadores y presencia de vida: Venus, la Tierra y Marte

La sonda Galileo, en su camino a Júpiter, revisitó nuestro planeta con objeto de obtener suficiente impulso para conseguir la trayectoria adecuada y alcanzar al gigante gaseoso. Los detectores de la nave fueron capaces de identificar la presencia de actividad biológica y por tanto validaron la posibilidad de hacer lo propio en otros planetas mediante el uso de instrumentación controlada de manera remota. Tres fueron las evidencias:

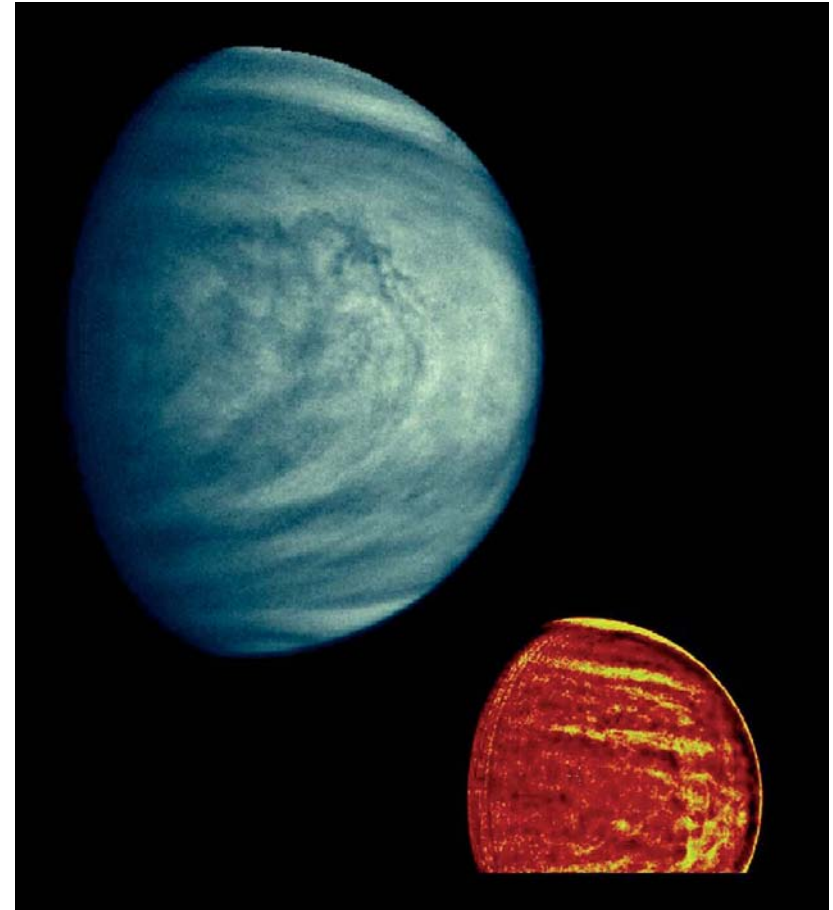


■ El satélite Envisat y su instrumento SCIAMACHY permiten un seguimiento de la producción de metano sobre la superficie de la Tierra. Los datos corresponden a medias en el periodo agosto-noviembre de 2003. Las zonas con alta producción de metano, como China o la India, son debidas a la presencia de campos arroceros o a la presencia de rumiantes. Las variaciones de las concentraciones son altamente estacionales. En África o América del Sur podrían ser producidas en zonas pantanosas, por termitas, rumiantes, quemas de biomasa o tener otro origen aún no determinado. El metano es un gas con gran potencial para generar el efecto invernadero. Sin embargo, sus concentraciones son mucho menores que las del dióxido de carbono. Créditos: Universidad de Heidelberg/KNMI.

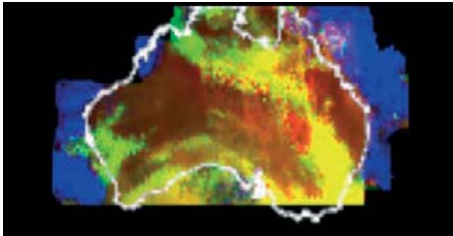


■ Esta imagen fue tomada dos días y medio después del lanzamiento de la sonda Galileo, en su segundo vuelo cerca del planeta, el 11 de diciembre de 1990, desde una distancia de 1,9 millones de kilómetros.

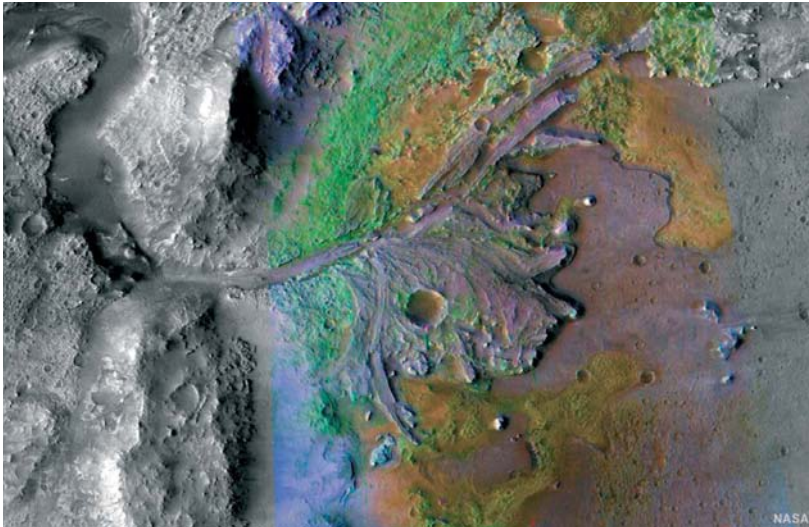
- El efecto que tiene la presencia de clorofila en el espectro, especialmente en las medidas tomadas sobre los continentes. Por tanto, la actividad fotosintética se detecta de manera clara y directa.
- La detección de características espectrales producidas por el oxígeno molecular, presente de manera abundante en la atmósfera. Debido a que el oxígeno reacciona con el material superficial, su presencia en concentraciones tan altas debe ser originada por su producción por parte de seres vivos durante la fotosíntesis.
- La coexistencia de metano y oxígeno, imposible bajo condiciones de equilibrio termodinámico. Es la actividad bacteriana la que produce este gas de manera continuada, que se oxida rápidamente en la atmósfera terrestre y desaparece, requiriendo una fuente continua.



■ Venus, observado por la sonda Galileo en dos rangos distintos del espectro: óptico, con bandas que corresponden a neblinas de ácido sulfúrico; e infrarrojo, que es capaz de penetrar hasta una parte más interna de la atmósfera. La sonda no detectó ninguna actividad biológica. Este planeta, de tamaño más reducido que la Tierra (un 95%, aproximadamente), posee unas condiciones extraordinariamente duras. Su presión atmosférica a nivel del terreno es muy superior a la terrestre al nivel del mar (de hecho, equivale a la presente a 900 metros de profundidad en el mar). Su temperatura, con una media de 462 grados Celsius, es capaz de fundir metales tales como el plomo. Ello es debido al alto contenido de dióxido de carbono en su atmósfera, que ha producido un efecto invernadero devastador.



■ Australia desde la nave Galileo, durante su aproximación más cercana a la superficie del planeta, a unos 80 000 km. La imagen, de baja resolución espacial, es el resultado de componer varias tomadas a diferentes longitudes de onda, en la parte más roja del espectro visible (o la más azul del espectro infrarrojo). El azul destaca la absorción debido al agua, mientras que el rojo representa la tierra y las nubes espesas. El verde corresponde a concentraciones de vapor de agua. La superposición de rojos y azules revela la presencia de grandes estructuras coralinas en la Gran Barrera de Coral. Créditos: NASA/JPL y el instrumento Near Infrared Mapping Spectrometer.



■ Imagen del delta del cráter Jezero, obtenida con la sonda Mars Reconnaissance Orbiter sobre el Planeta Rojo. Los colores con tonos verdes indican la presencia de materiales arcillosos que solo se han podido formar por la presencia de agua líquida, en este caso en un pasado lejano. Hasta el momento, en Marte no se ha detectado ninguna evidencia de actividad biológica: ni actual ni en su pasado. Créditos: NASA/JPL/JHUAPL/MSSS/Brown University.

Los planetas Marte y Venus, que se asemejan a nuestro planeta en ciertas propiedades genéricas (localización en la proximidad de la zona de habitabilidad, tamaños y densidades comparables de manera aproximada, presencia de atmósferas), como es conocido, no presentan evidencias de actividad biológica, aunque en el caso de Marte aún se sigue buscando de manera activa.

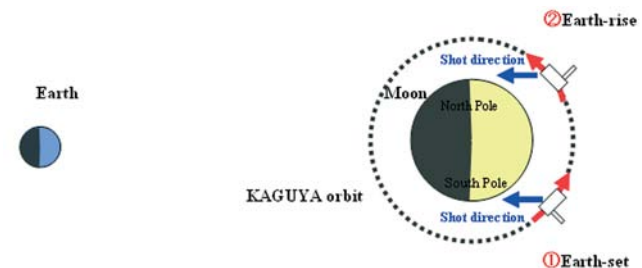
Ese pálido punto azul (I): la Tierra desde la Luna

Acostumbrados a ortos y ocasos del Sol, apenas prestamos atención a las salidas y puestas de la Luna sobre el horizonte terrestre, dada la diferencia de brillo y la difusión producida por la atmósfera terrestre. Sin embargo, desde nuestro satélite, la Tierra domina, con su gran tamaño angular y sus colores vivos, una esfera celeste oscura.



■ Una secuencia de imágenes correspondientes a la puesta de Tierra vista desde la sonda Kaguya/Selene, en órbita en torno a la Luna. Créditos: JAXA/ISAS.

El contraste es asombroso. El desierto lunar, baldío y gris, y los azules y blancos terrestres. Un pequeño y frágil planeta y, sin embargo, tan diverso.



■ Diagrama que muestra las posiciones relativas de la Tierra, la Luna y la sonda Selene/Kaguya durante las salidas y puestas de Tierra vistas desde nuestro satélite. Créditos: JAXA/ISAS.

La sonda japonesa Kaguya (Selene) ha tomado una espectacular secuencia de imágenes según orbitaba alrededor de la Luna. En ella se puede ver cómo nuestro planeta se oculta detrás del horizonte lunar.



■ A modo de comparación, una imagen de la Tierra y el horizonte lunar tomada durante la misión Apollo XI unos cuarenta años antes. Créditos: NASA.

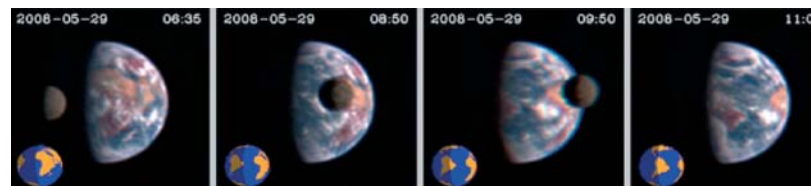
Las imágenes han sido tomadas en formato digital de alta resolución. Curiosamente, dado que el periodo de rotación de la Luna está sincronizado con su periodo de traslación alrededor de la Tierra, un observador situado en la superficie del satélite no podría ver las puestas y salidas de nuestro planeta sobre el horizonte lunar, dado que la Luna siempre muestra la misma cara. Solo desde una nave que orbite en torno a la Luna se puede apreciar el bello espectáculo. Ahora lo vemos por cortesía de la agencia espacial japonesa JAXA, que tiene un ambicioso programa de exploración espacial.



■ Otra imagen en alta resolución de la Tierra sobre el horizonte lunar, tomada con Selene/Kaguya. Créditos: JAXA/ISAS.

Ese pálido punto azul (II): naves en tránsito

Camino de sus destinos en el Sistema Solar, diferentes misiones espaciales nos han permitido disfrutar de otra visión de La Tierra. He aquí algunos ejemplos.

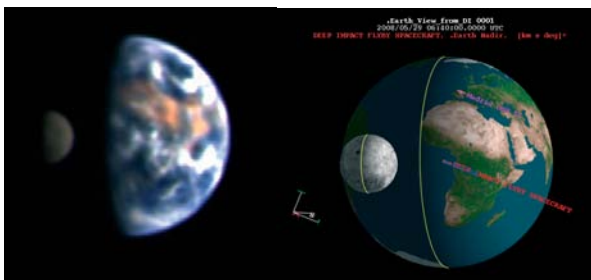


■ En ocasiones hay que alejarse, distanciarse, para poder apreciar la magnitud de un fenómeno. Eso es lo que está haciendo la sonda Deep Impact, que ha sido capaz de observar un tránsito lunar: cómo el disco de nuestro satélite bloquea parte de la luz que emite la superficie de nuestro planeta. Justamente una de las técnicas más poderosas que ahora se utilizan para descubrir y estudiar exoplanetas. La sonda Deep Impact, ahora denominada EPOXI, después de cumplir su misión al cometa Temple 1 en el 2004, se encamina hacia el cometa Hartley, al que sobrevolará en el 2010. En el ínterin, ha apuntado su instrumentación hacia la Tierra, y ha sido testigo de un tránsito de la Luna, proporcionándonos una bella secuencia de imágenes. Créditos: Donald J. Lindler, Sigma Space Corporation/GSFC; EPOCh/DIXI Science Teams.

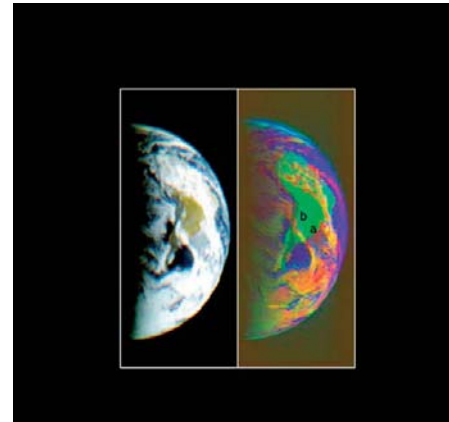


■ A una distancia de 2,6 millones de kilómetros, iniciado su camino a Venus y Mercurio (noviembre de 1973), la sonda Mariner 10 echó una mirada atrás y obtuvo unas impresionantes vistas de la Tierra y su satélite. Créditos: NASA.

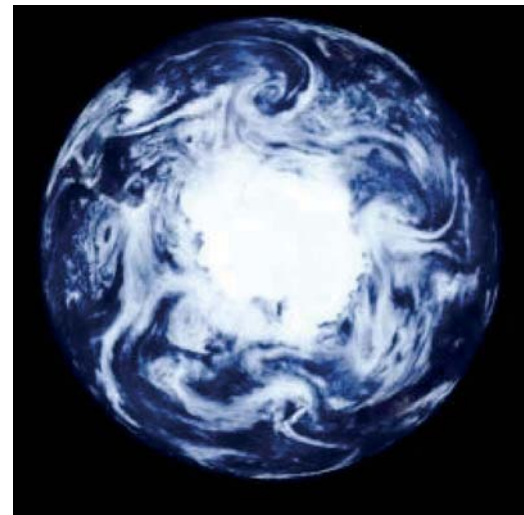
Ese pálido punto azul (III): Marte



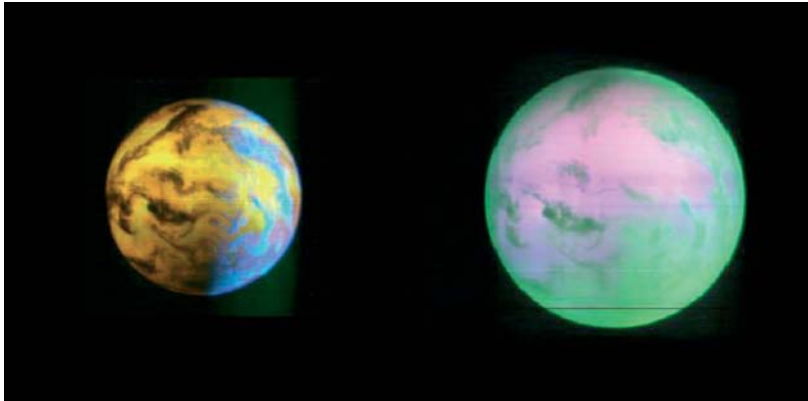
■ La sonda americana Deep Impact nos proporcionó esta vista del sistema Tierra-Luna, desde una distancia de casi 50 millones de kilómetros (foto del 29 de mayo de 2008). Créditos: NASA/JPL-Caltech/UMD/GSFC.



■ La sonda Rosetta, de la Agencia Espacial Europea, en su camino hacia el cometa 7P/Churyumov-Gerasimenko, ha realizado dos asistencias gravitatorias utilizando nuestro planeta como pivote para alcanzar su objetivo. También ha sobrevolado Marte y el asteroide 2867 Steins. A finales del 2009 volvió a acercarse a la Tierra. En julio de 2010 sobrevoló el asteroide 21 Lutetia. Los dos paneles corresponden a colores reales y falso color (para realzar los detalles); las imágenes fueron tomadas en el rango óptico con el instrumento VIRTIS. Créditos: ESA.



■ Mosaico de la Antártida compuesto de múltiples imágenes tomadas durante un intervalo de 24 horas por la sonda Galileo. Créditos: NASA/JPL.



■ Otras perspectivas tomadas con la sonda Rosetta. Izquierda.- Noche y día en la Tierra, durante la aproximación más cercana (250 000 km) de la sonda, vistos simultáneamente en los rangos óptico e infrarrojo. La cara nocturna se observa en colores amarillos, mientras la diurna se revela por sus tonalidades azuladas. Derecha.- Esta imagen infrarroja tomada con el instrumento VIRTIS muestra la concentración relativa de dióxido de carbono, en las zonas dominadas por los colores verdosos.

El planeta Marte es fascinante. Nos subyuga, nos llama... Alzamos los ojos hacia ese punto rojizo y sentimos su canto. Tal vez sea una balada de sirenas. Pero, ¿cómo se ve nuestro planeta desde Marte?

La sonda Mars Global Surveyor, al abandonar la Tierra, obtuvo excelentes imágenes, en las que se apreciaba el perfil de la costa americana. Con anterioridad, la Mars Odisey, al alejarse de nuestro planeta, lo observó con su cámara infrarroja, mostrando claramente el Polo Sur (mancha oscura) y Australia (la zona más brillante) desde una distancia de 3,5 millones de kilómetros (la emisión en infrarrojo, especialmente el rango denominado medio, está relacionada con la temperatura del objeto que emite).

Pero, ¿cómo se vería nuestro planeta desde la superficie de Marte? Gracias a los vehículos Opportunity y Spirit, no es necesario que especulemos. En el caso de la fotografía tomada con Spirit, corresponde a la primera de la Tierra tomada desde la superficie de otro cuerpo del Sistema Solar, exceptuando la Luna. Sobre el horizonte, la alborada domina el cielo, y la Tierra se ve como un débil punto.



■ La Tierra, en una imagen tomada desde la superficie de Marte por Opportunity. Créditos: NASA.

Ese pálido punto azul (IV): las fases de la Tierra

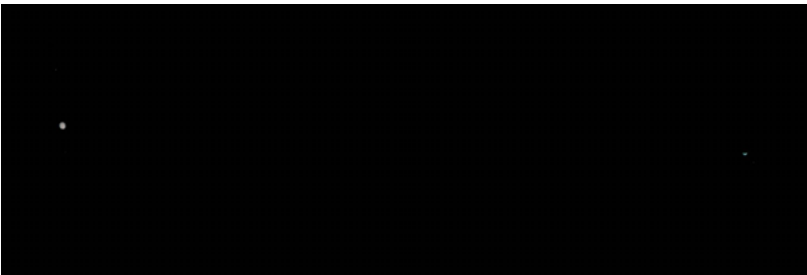


■ Fotografía análoga a la anterior, pero en esta ocasión es Spirit el origen de la imagen, que fue tomada el 7 de marzo del 2004 justo antes de la salida del Sol. Créditos: NASA/JP/Cornell/Texas A&M.



■ La Tierra y la Luna desde la sonda Mars Odissey, en una imagen tomada con una cámara en el rango del infrarrojo medio, cuando la nave se alejaba camino de su objetivo. Créditos: NASA/JPL/Universidad de Arizona.

Son numerosas las fotos y dibujos de Marte vistos desde nuestro planeta. Pero, ¿cómo se ve la Tierra desde nuestro rojo -o naranja- vecino? La sonda Mars Global Surveyor ha tomado varias espectaculares, realizadas en el año 2003. En ellas se observa la Tierra, la Luna, Júpiter y varios de sus satélites principales. Todo un cambio en la perspectiva a la que estamos acostumbrados. A veces es muy conveniente salir de nosotros mismos, cambiar de posición, ponerse en el lugar de «El Otro».



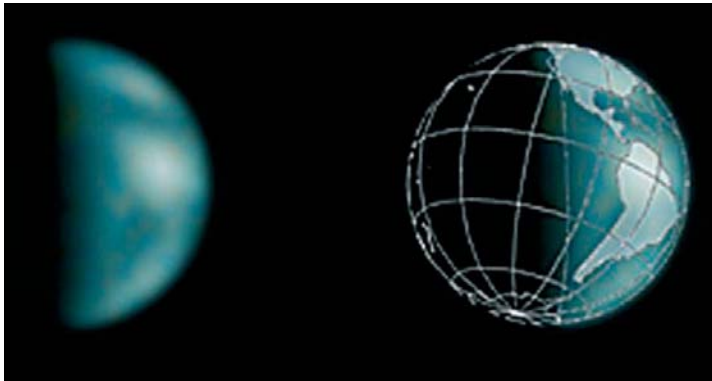
■ También hay unas impresionantes vistas de Júpiter junto a varios de sus satélites principales. Júpiter a la izquierda, con la Tierra y la Luna a la derecha de la imagen. Nuestro satélite es apenas perceptible. La foto fue tomada con el instrumento Mars Orbiter Camara, a bordo de MGS, de NASA. Verdaderamente esta sonda, que años después sigue funcionando y proporcionando datos de exquisita calidad, ha dado grandes alegrías a la comunidad científica y al público en general.

La foto de la Tierra muestra que también nuestro planeta tiene fases, como la Luna o Mercurio y Venus, los planetas interiores. No olvidemos que nuestro planeta queda en una órbita interna a la de Marte y que las fases están creadas por un efecto geométrico, la posición relativa entre el Sol que ilumina, el objeto que refleja y el observador.

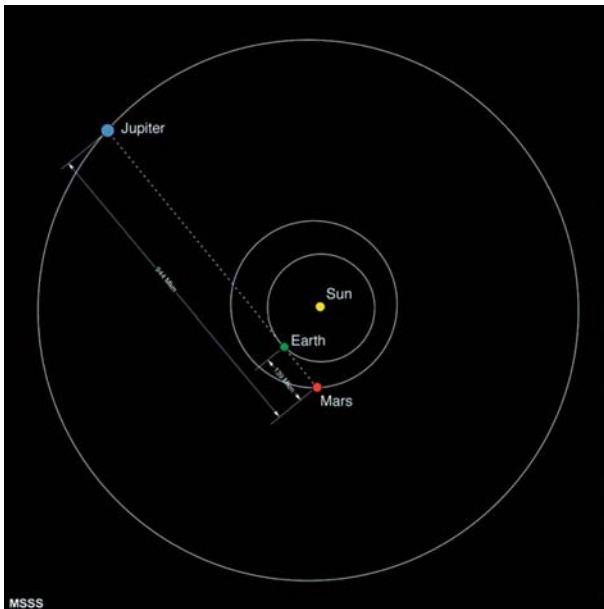
La visión de nuestro planeta se antoja como la que tendría que haber contemplado Schiaparelli durante la oposición de 1877, cuando empezó a dibujar un detallado plano de Marte, dando el nombre de «canales» a las estructuras que creyó ver en la superficie del planeta. Él afirmó en todo momento que los canales eran naturales. Sin embargo, generarían una gran cantidad de especulación (los falsos «canales artificiales» de Marte). Un ejemplo reciente está en las «caras» de Marte, también ilusiones ópticas.



■ La Tierra y la Luna, con media cara iluminada. Créditos: NASA/MGS.



■ La Tierra, vista por la sonda Mars Global Surveyor, en órbita en torno al planeta Marte. Se aprecia claramente que nuestro planeta también tiene fases, cuando es avistado desde planetas exteriores, y la forma del continente americano. Créditos: NASA/MGS/Malin Space Science Systems.



■ Diagrama con las órbitas de Júpiter, Marte, y la Tierra, donde se observa la aparente cercanía entre Júpiter y la Tierra al ser vistos desde Marte en un momento muy específico, lo que permitió la adquisición de la fotografía anterior. Créditos: NASA/MGS.

Ese pálido punto azul (V): Saturno

La misión Cassini-Huygens, de las agencias espaciales estadounidense (NASA), europea (ESA) e italiana ha sido compleja y ha requerido largos años de viaje. Sus objetivos principales han sido el propio planeta Saturno y su satélite Titán, donde se posó la sonda Huygens.

Aprovechando su paso por detrás de Saturno, y dejando al Sol detrás del planeta, Cassini obtuvo la imagen única. El gran planeta anillado hace de escudo, eclipsando al Sol. Pero además se puede apreciar nuestro planeta, en una perspectiva totalmente distinta.



■ Saturno y su sistema de anillos, observados por la nave Cassini en 2006. A la izquierda del planeta y al lado de los anillos más brillantes se ve al fondo la Tierra. Créditos: NASA/JPL-Caltech.

Ese pálido punto azul (VI): confines del Sistema Solar

Y alcanzamos los confines del Sistema Solar... a 6400 millones de kilómetros de casa, ¿cómo se verá la Tierra?

La misión Voyager, compuesta por dos sondas prácticamente gemelas y lanzadas con pocos días de diferencia (20 de agosto y 5 de septiembre de 1977), ha sido una de las más exitosas de todo el programa de exploración planetaria. De hecho, la Voyager II todavía sigue funcionando. Han visitado los planetas más externos del Sistema Solar, los gigantes gaseosos: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, y se encuentran entre los objetos más veloces creados por el hombre. Entre sus muchos récords, la Voyager I envió la primera foto del sistema Tierra-Luna.



■ La Voyager I alejándose de casa, poco después de partir el 5 de septiembre de 1977, a una distancia de 11,66 millones de kilómetros. Créditos: NASA/JPL.

En febrero de 1990 la sonda Voyager I tomó una serie de imágenes únicas, a sugerencia del conocido divulgador y astrónomo Carl Sagan: fotografías del planeta Tierra desde los confines del Sistema Solar. Entonces se encontraba ya a 6400 millones de kilómetros, y muy por encima del plano de la eclíptica, en el cual orbita nuestro planeta en torno al Sol. La Tierra se ve como un punto, tan pequeño y débil que podría pasar inadvertido. Un pálido punto azul. Frágil, delicado... perdido en mitad del espacio. Sin embargo, nuestro hogar. Nada mejor que las palabras del mismo Sagan:

«Mira de nuevo ese punto. Eso es “aquí”. Eso es casa. Eso es “nosotros”. Sobre él, todo aquel que amas, todo aquel que conoces, todo aquel del que has oído hablar, cada ser humano que ha existido, y que vivió su vida. La suma de nuestra alegría y sufrimiento, los miles de religiones, ideologías y doctrinas económicas seguras de sí mismas, cada cazador y recolector, cada héroe y cobarde, cada creador y destructor de la civilización, cada rey y campesino, cada joven pareja enamorada, cada madre y padre, cada niño esperanzado, inventor y explorador, cada maestro de moral, cada político corrupto, cada “superestrella”, cada “líder supremo”, cada santo y pecador en la historia de nuestra especie vivió ahí, en una mota de polvo suspendida en un rayo de luz del Sol.

La Tierra es un escenario muy pequeño en una vasta arena cósmica. Piensa en los ríos de sangre derramada por todos esos generales y emperadores, para que, en gloria y triunfo, pudieran convertirse en amos momentáneos de una fracción de un punto. Piensa en las interminables crueldades infligidas por los habitantes de una esquina de ese píxel sobre los apenas distinguibles habitantes de alguna otra esquina; lo frecuente de sus incomprensiones, lo ávidos de matarse unos a otros, lo ferviente de su odio.

Nuestras actitudes, nuestra imaginada arrogancia, la ilusión ficticia de que tenemos una posición privilegiada en el Universo, son desafiadas por este punto de luz pálida. Nuestro planeta es una mota solitaria de luz en la gran oscuridad cósmica que nos envuelve. En nuestra oscuridad, en toda esta inmensidad, no hay ni un indicio de que la ayuda llegará desde algún otro lugar para salvarnos de nosotros mismos.

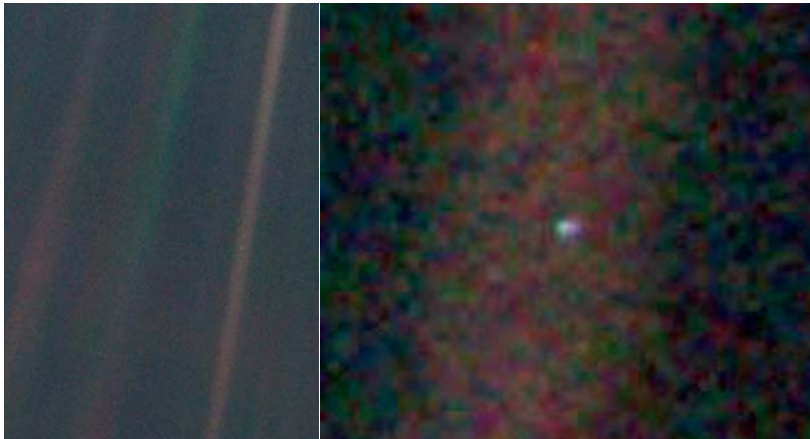
La Tierra es el único mundo conocido hasta ahora que alberga vida. No hay ningún otro lugar, al menos en el futuro próximo, al cual nuestra especie pudiera migrar. Visitar, sí. Colonizar, aún no. Nos guste o no, de momento la Tierra es donde tenemos que quedarnos.

Se ha dicho que la Astronomía es una experiencia de humildad y construcción del carácter. Quizá no hay mejor demostración de la necedad de los prejuicios humanos que esta imagen distante de nuestro minúsculo mundo. Para mí, subraya nuestra responsabilidad de tratarnos los unos a los otros de una forma más bondadosa, y de preservar ese punto azul claro, el único hogar que jamás hemos conocido».

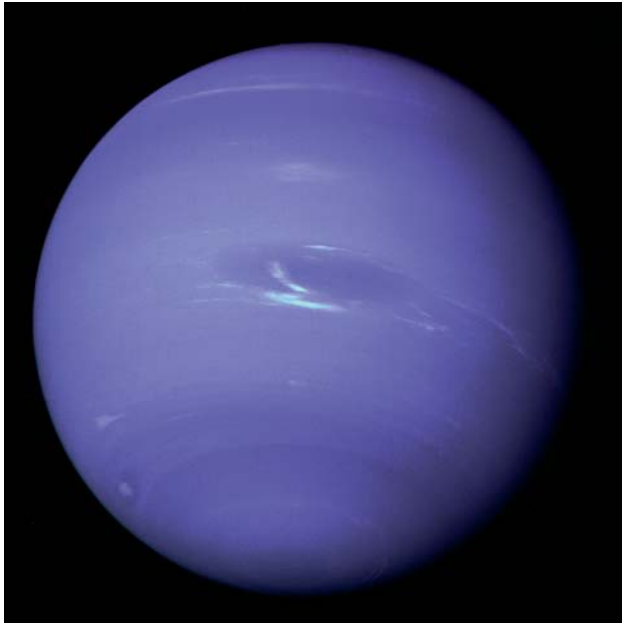
(Carl Sagan, *Pale Blue Dot*, 1994)

Me emociono al leerlo. Me emociono al ver la imagen. Deseo que ese pálido punto siga teniendo esos colores... donde la vida continúe, donde los seres humanos no hayan devastado ecosistemas y recursos en una vana carrera sin sentido.

Un pálido punto azul. Eso es todo lo que tenemos.



■ Izquierda: Una de las 60 imágenes que el Voyager I tomó en 1990, a 6400 millones de kilómetros, después de más de 13 años de viaje (créditos NASA/JPL). Derecha: Una ampliación de una de esas fotografías. Créditos: NASA/JPL.



Parte V

Allende los mares siderales

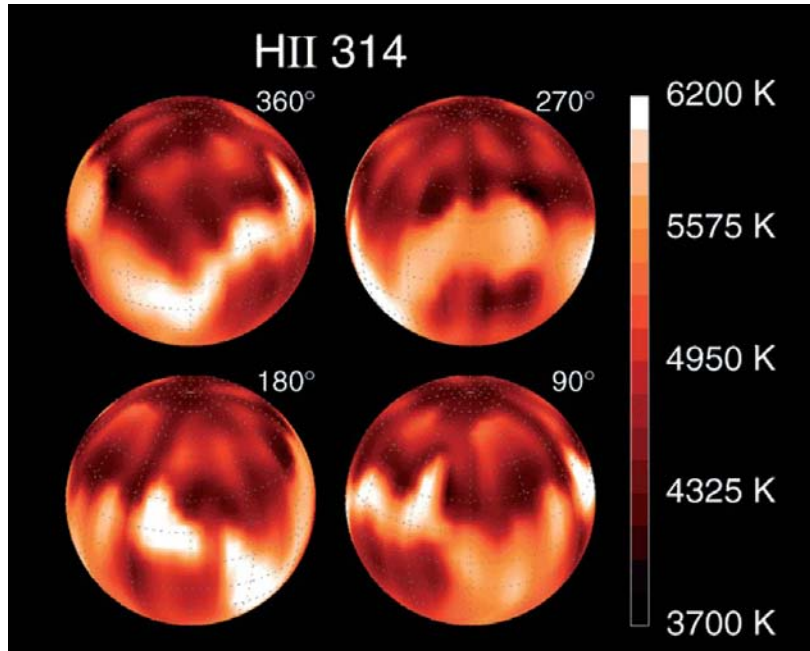
■ El planeta Neptuno, en una toma adquirida por la sonda americana Voyager II.

El pasado del Sol y del Sistema Solar

Viajar hacia el pasado... una idea sugestiva, que en realidad se puede realizar, si, como Ulises, utilizamos nuestra astucia. Pero antes debemos saber a qué momento y dónde queremos ir. En el caso de nuestra estrella, el Sol, es posible conocer al menos parcialmente cómo era en el pasado. Y cómo pudo afectar a la formación de su sistema planetario y, por ende, a la formación y evolución de nuestro planeta, la Tierra.

El conocimiento del pasado del Sol (y de su futuro) está asentado en una de las pocas teorías astronómicas de gran precisión: la de la evolución estelar, que implica un conocimiento detallado de la propia estructura del Sol y, por extensión, de otras estrellas. Mediante el uso de modelos numéricos y de nuestro conocimiento actual de la Física (en realidad unas pocas ecuaciones bastante simples), es posible estimar las propiedades internas y externas de una estrella de una masa y una composición química determinada (la fracción de hidrógeno y helio, los dos componentes básicos, junto con otros elementos químicos). Lo que es más, es posible seguir la evolución de esas propiedades con el tiempo. Estos modelos teóricos se han contrastado numerosas veces con observaciones realizadas, por ejemplo, en asociaciones estelares de diversas edades (desde el Trapecio, con una edad aproximada de un millón de años, hasta los cúmulos globulares más viejos, casi tan longevos como el propio Universo). El propio Sol nos da importantes evidencias sobre su estructura interna, mediante el uso de una sofisticada técnica denominada heliosismología (similar al estudio de los terremotos, que nos indican de qué está hecho el interior de la Tierra y cómo está distribuido ese material), que también se ha aplicado con éxito a unas pocas estrellas (astrosismología).

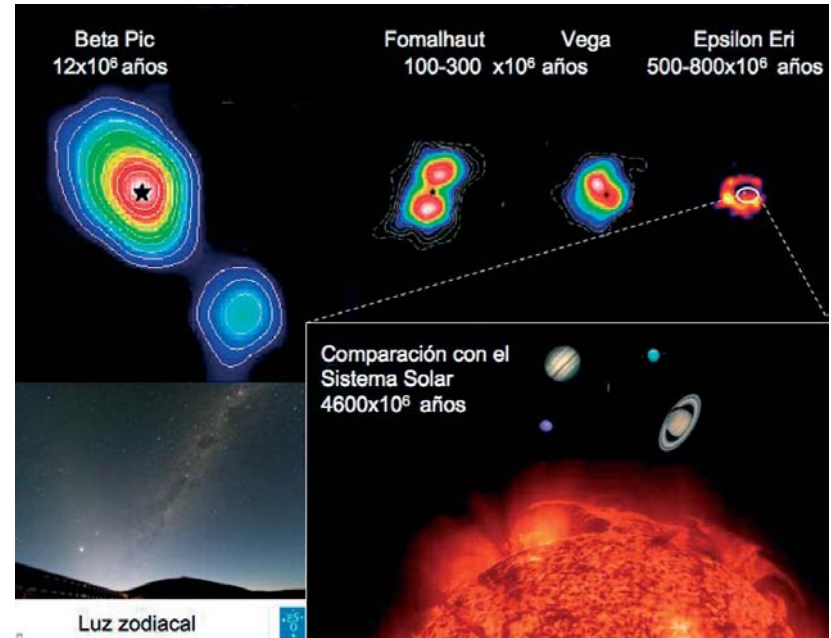
Por si fuera poco, el Sol, como cualquier otra estrella, tiene «mellizos», aunque no hayan nacido a la vez. Las dos características fundamentales de una estrella son su masa y su composición química (además de otros parámetros secundarios, como podría ser su momento angular, relacionado con la velocidad de rotación). Los análogos solares son astros de características semejantes a las del Sol, pero con edades muy distintas. Así, estudiando una muestra lo suficientemente grande de este tipo de estrellas que se encuentren en momentos evolutivos muy distintos, podemos en realidad construir una película de la propia vida de nuestro astro-rey. Este es el caso de estrellas tales como IM Lup, EK Dra, Pi¹ UMa, Kappa¹ Cet, Beta Com, o Beta Hyi, localizadas a distancias bastante cercanas y que tienen edades desde unos pocos millones hasta 10 000 millones de años, el doble que el Sol.



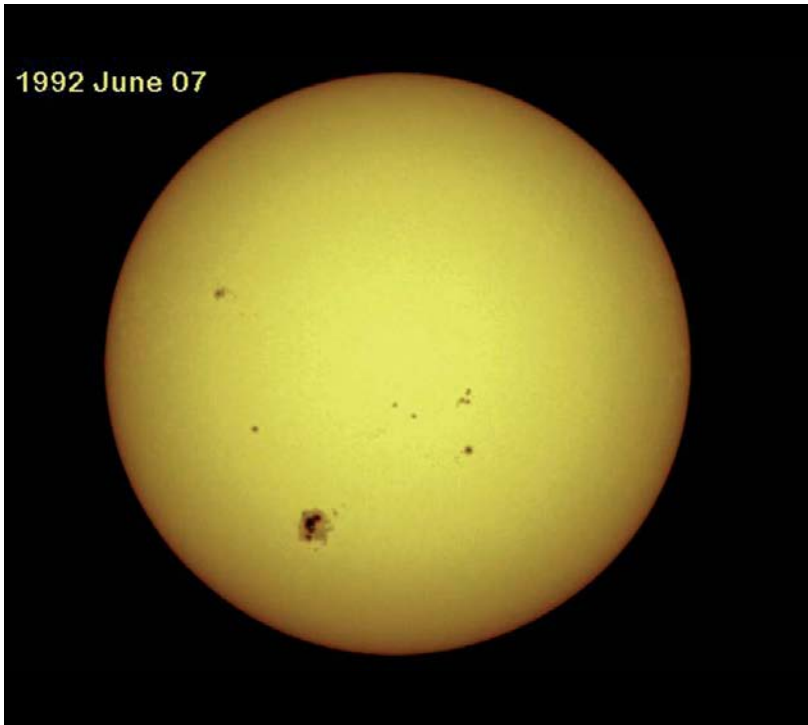
■ Reconstrucción de la superficie de la estrella HII 314, un análogo solar que pertenece al cúmulo de las Pléyades (con una edad de unos 125 millones de años), mediante la técnica del «Doppler Imaging». La escala de color indica la temperatura de la mancha o de la fotosfera inactiva. Las estrellas muy jóvenes muestran manchas de gran tamaño, que cubren una parte significativa de su superficie (o un gran número de manchas de tamaño más reducido, pero cuyo efecto global es análogo). Créditos: K. G. Strassmeier.

Incluso, podemos reconstruir la propia formación del Sistema Solar, incluyendo cómo los diferentes planetas se han ido ensamblando a partir del material circunestelar que aparece como consecuencia de la propia formación estelar, la evolución de dicho material, y la aparición de los propios planetas. De hecho, de la lista de exoplanetas, existe un gran número que orbitan alrededor de estrellas de tipo solar, cuya masa es aproximadamente igual a la del Sol. Obviamente, este fenómeno es un sesgo observacional, dado que la mayor parte de las búsquedas seleccionaban estrellas de este tipo. Pero es un indicio importante que apunta a que los exoplanetas aparecen casi como consecuencia de la formación de la estrella, incluso en ambientes verdaderamente exóticos.

No, no podemos trasladarnos físicamente al pasado. Pero con técnicas ingeniosas podemos reconstruir lo que aconteció: cómo era el Sol cuando era mucho más joven, y cómo esas propiedades afectaron a la evolución de la Tierra y sus condiciones de habitabilidad.



■ Diferentes discos de debris, que corresponden al remanente de la posible formación de sistemas planetarios, alrededor de los cuatro prototipos: Beta Pictoris, Fomalhaut, Vega y Epsilon Eridani, con edades que van desde los 10 a los casi 1000 millones de años. Los tamaños han sido escalados convenientemente para eliminar el efecto de la distancia a cada sistema. Las cuatro imágenes fueron tomadas por W. S. Holland y colaboradores con un instrumento que funciona en el submilimétrico (a 850 micras) y que por tanto ve material a muy baja temperatura como es el polvo de los discos. Nuestro propio Sistema Solar aparecería con un tamaño menor al disco de Epsilon Eridani (aproximadamente como la elipse representada dentro del disco de la estrella). En el detalle, se muestran los ocho planetas del Sistema Solar y el Sol respetando las proporciones entre sus tamaños respectivos. También se incluye una imagen tomada desde el observatorio de Paranal (Chile) que muestra la Vía Láctea y, con una inclinación de unos 45 grados, la luz zodiacal, producida por partículas de polvo dentro del Sistema Solar, restos del disco circunestelar que dio lugar a la formación del mismo.



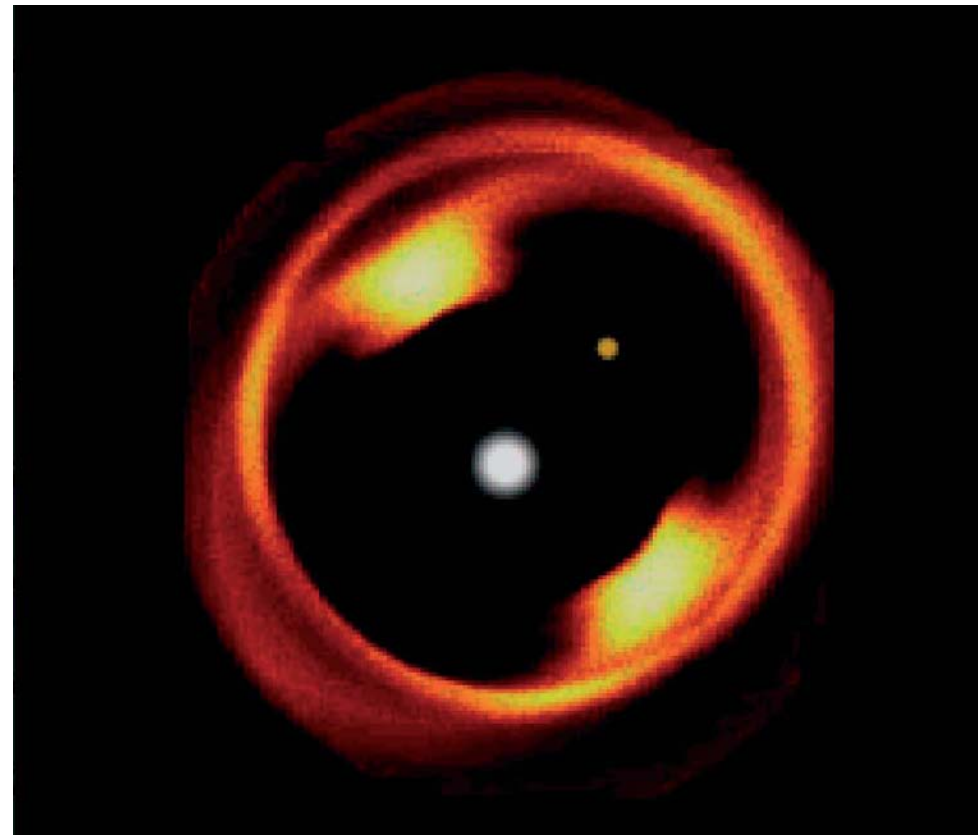
■ La fotosfera del Sol, que muestra algunas manchas de tamaño reducido. El periodo de rotación del Sol es de unos 27 días, aunque las regiones polares rotan a una velocidad algo inferior a las ecuatoriales (en un fenómeno denominado rotación diferencial). A su vez, las manchas (y la actividad solar en general) tienen un ciclo de unos 11 años (22 años si se tiene en cuenta la polaridad magnética), con mínimos y máximos en el número de manchas fotosféricas.

Un verdadero Sistema Planetario a 40 años luz

¿Cómo se vería el Sistema Solar desde pocas decenas de pársec de distancia? En vez de especular, veamos cómo son los sistemas planetarios que hemos sido capaces de detectar hasta el momento por diferentes técnicas.

Ya son cinco... los planetas orbitando alrededor de la estrella 55 Cnc. Un verdadero sistema planetario, con objetos cuyas masas van desde cuatro veces la masa de Júpiter para su miembro más masivo hasta un séptimo en el caso de 55 Cnc f (esto es, 45 veces la masa de la Tierra).

Las órbitas se encuentran entre 5 unidades astronómicas (ua), similar a la distancia a la que se haya Júpiter del Sol, hasta 0,038 ua, muy cerca de la estrella central. Mercurio, el planeta más próximo al Sol, se encuentra a 0,387 ua. La Tierra, por definición, está a una unidad astronómica (aproximadamente 150 millones de kilómetros). Los datos espectroscópicos, junto con uso de la técnica de la velocidad radial, que han permitido el descubrimiento de estos cinco planetas, han sido toma-

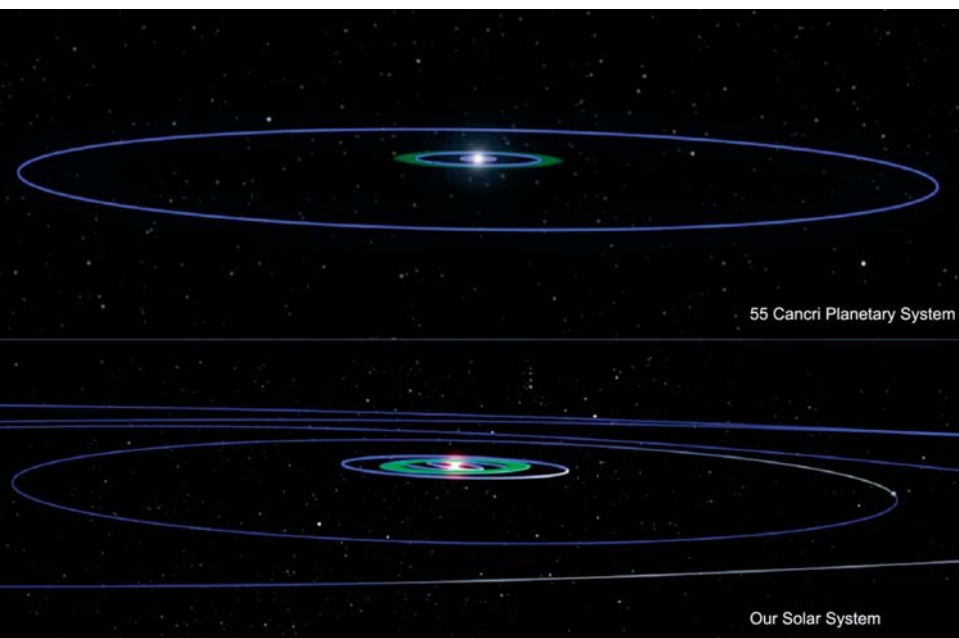


■ El telescopio espacial James Webb Space Telescopio, cuyo lanzamiento está previsto en el año 2015, será capaz de detectar planetas tipo terrestre en órbita alrededor de estrellas cercanas, mediante el uso de un coronógrafo, que bloquea la luz que proviene de la estrella central. La imagen muestra una simulación de lo que podría ser una observación de la estrella Vega, que posee un disco circunestelar, y un hipotético planeta.

dos a lo largo de los últimos 18 años. Todo un ejercicio de paciencia astronómica. Se trata, por tanto, de un verdadero análogo del Sistema Solar. Sin embargo, las masas de los planetas son considerablemente superiores a la de nuestro planeta.

La gran mayoría de exoplanetas han sido encontrados por la técnica de la velocidad radial. Eso implica que en realidad solo se establecen los límites inferiores de las masas, ya que no se conocen los ángulos de inclinación de las órbitas respecto a la línea de visión. En el caso de que algún exoplaneta cruzara el disco de la estrella central, si por casualidad se alinea la estrella, el planeta y el observador (produciendo un eclipse o tránsito), se podrían determinar todos los parámetros con gran precisión, incluyendo los radios y las masas, si los datos se combinan con espectroscopía.

El satélite de la NASA Kepler, cuyo lanzamiento se produjo en marzo del año 2009, tiene como misión la detección de planetas tipo terrestre mediante la técnica de los tránsitos.



■ Comparación de los tamaños del sistema planetario de la estrella 55 Cancri y del Sistema Solar. Créditos: NASA/JPL/Caltech.

Récords interplanetarios

¿Cuál es la norma y qué lo excepcional? Aunque los científicos dedicamos gran parte de nuestro tiempo a la clasificación, no suele estar siempre claro. En el caso de los planetas extrasolares, la situación es, verdaderamente, confusa.

Durante años se suponía que, de existir algún sistema planetario alrededor de otra estrella, este sería muy similar al Sistema Solar, y tanto la jerarquía como las masas y propiedades de sus planetas serían semejantes a las que encontramos en él, con planetas de tipo terrestre (esencialmente rocosos) y otros similares a Júpiter (mucho más masivos y gaseosos, situados a mayores distancias de la estrella). Sin embargo, con el descubrimiento de, a día de hoy (julio 2010), 433 planetas en 371 sistemas planetarios, se puede decir que una palabra describe las propiedades básicas: diversidad. Y dentro de esa diversidad, están los extremos, los planetas que se salen de toda norma, que van mucho más allá de lo que la imaginación podría sugerir.

En realidad la situación no es tan compleja. Si miramos a los componentes del Sistema Solar e incluimos también a planetas enanos y a los satélites, nos percatamos de que muchos de esos extremos están cerca, son nuestros vecinos: incluso habitamos en uno de ellos. Por supuesto, también están nuestros sesgos observacionales, ya que conocemos mucho mejor nuestro Sistema Solar que lo que está más allá de los mares interestelares. Veamos algunos ejemplos de extremos:

I) Por sus propiedades físicas:

- CoRoT-Exo-1 b, el planeta de mayor tamaño.
- PSR 1257+12 b, el planeta de menor masa. O Mercurio, dentro del Sistema Solar y de masa comparable a aquel.
- La Tierra, por la alta densidad. Dentro de los muy densos se encuentra XO-3 b.
- Saturno y Marte por su forma.
- Por su composición química, destacan Júpiter, Mercurio, HD 149026 b. Dentro de este grupo se encuentran satélites de la Tierra y Saturno. La Luna, por su carencia de agua, y Tetis, por la gran cantidad de este compuesto químico.
- Por su temperatura superficial, HD 149026 b, unos 2000 grados kelvin.

II) Por sus propiedades dinámicas:

- Por su órbita, Neptuno, OGLE-TR-56 b y HD 80606 b.
- Por su rotación, Júpiter y Venus.



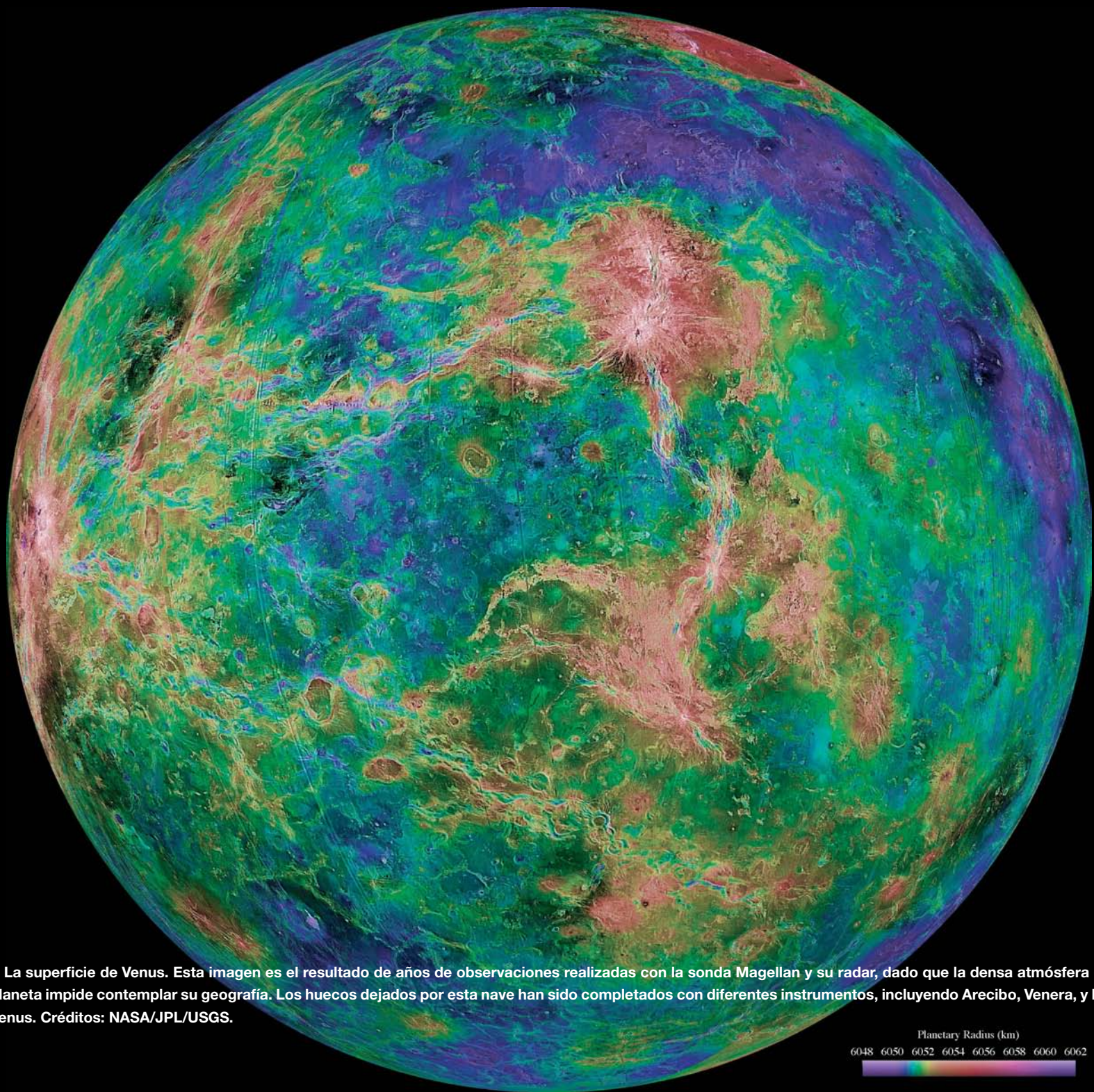
Tetis, un satélite de Saturno con un tamaño de unos 1071 kilómetros de diámetro, visto por la misión Cassini-Huygens. Los datos indican que esencialmente está compuesto de agua helada. La imagen (en realidad un mosaico formado por cuatro fotografías) muestra el cráter Odysseus, que tiene un diámetro de unos 450 kilómetros. Créditos: NASA/JPL/Space Science Institute.

III) Por la configuración del sistema planetario:

- Complejidad del sistema planetario. Después del Sistema Solar, el correspondiente a 55 CnC, con 5 exoplanetas.
- El planeta enano Plutón, junto con su satélite Caronte, por ser prácticamente gemelos, de masa equiparable.
- Por la estrella huésped: PSR 1257+12 b (una estrella de neutrones), GJ 317 (mínima masa, estimada en 0,25 masas solares), Epsilon Tau (máxima masa, unas 2,7 masas solares).
- Por el entorno, PSR B1620-26 (una estrella de neutrones) localizado en un viejísimo cúmulo globular (NGC6121) con miles de estrellas.
- 2M1207 b, por la diferencia de masa entre la componente central (una enana marrón) y el planeta, veinte masas jovianas frente a cinco. Además, el planeta orbita a 46 unidades astronómicas.



■ La Luna, vista desde la sonda Galileo (7 de diciembre de 1992) durante las complejas maniobras realizadas para poder alcanzar la órbita de Júpiter. La nave estuvo estudiando el sistema joviano durante los años 1995-1997, pero esta fotografía (composición de varias tomadas a diferentes longitudes de onda, desde el violeta hasta el infrarrojo muy cercano) de muy alta resolución nos muestra claramente la diferencia entre diferentes regiones de nuestro satélite: el cráter de impacto Tycho (abajo, región brillante), Oceanus Procellarum (izquierda), Mare Imbrium (centro izquierda), Mare Serenitatis y Mare Tranquillitatis (centro), y Mare Crisium (cercano al borde de la derecha). La Luna se caracteriza por su bajísimo contenido en agua. Créditos: NASA/JPL/USGS.



■ La superficie de Venus. Esta imagen es el resultado de años de observaciones realizadas con la sonda Magellan y su radar, dado que la densa atmósfera de este planeta impide contemplar su geografía. Los huecos dejados por esta nave han sido completados con diferentes instrumentos, incluyendo Arecibo, Venera, y Pioneer Venus. Créditos: NASA/JPL/USGS.

Planetary Radius (km)
6048 6050 6052 6054 6056 6058 6060 6062

Por supuesto, los récords se baten con facilidad. Solo hay que seguir intentándolo. De hecho, la tasa de descubrimientos es tan alta que, según se escriben estas líneas, van quedando obsoletos.



■ El cúmulo globular NGC6121 (Messier 4), fotografiado por el telescopio de 0,9 metros de Kitt Peak National Observatory. Este riquísimo cúmulo contiene miles de estrellas viejas (aproximadamente 12 000 millones de años), poco más joven que el mismo Universo (13 600 millones de años). Dentro de esta asociación se localiza un pulsar (una estrella de neutrones) alrededor del cual se ha detectado un planeta, que probablemente se creó a partir del material producido por la explosión que dio lugar a la formación de la estrella de neutrones. Dada la densidad de estrellas en el cúmulo, el cielo visible desde el planeta debe ser extraordinariamente brillante y exótico. Créditos: NOAO/AURA/NSF.

Primera imagen directa de un sistema planetario orbitando una estrella

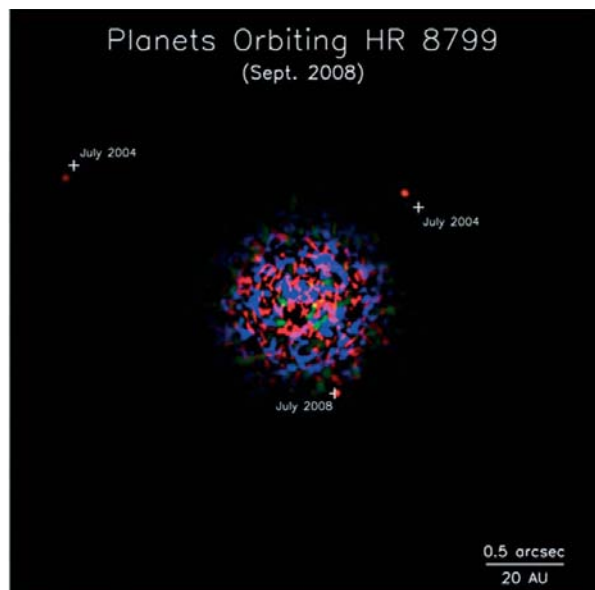
Un equipo internacional, usando los telescopios Gemini y Keck, en Hawái, ha sido capaz de conseguir la primera imagen de un verdadero sistema planetario orbitando alrededor de una estrella. Se trata de HR8799, una estrella bastante joven con una masa 1,5 veces la del Sol. Se confirma ahora la presencia de tres exoplanetas, con unas 7 y 10 veces la de Júpiter, orbitando a gran distancia de la estrella (15, 40 y 70 unidades astronómicas, la que media entre el Sol y la Tierra). El sistema también incluye un tenue disco de polvo, resto de la formación del sistema y análogo al existente en el Sistema Solar, aunque, por la edad del sistema, debiera ser bastante más masivo. De hecho, discos y planetas son subproductos de la propia formación de las estrellas, que durante sus primeros millones de años de vida pasa por unas etapas bien definidas.

La mayor parte de los planetas han sido descubiertos por el método de la velocidad radial (obteniendo espectros de alta resolución) o por los tránsitos planetarios (estudiando la variación periódica de la curva de luz). Son, por tanto, indirectos y, aunque muy interesantes por la información que proporcionan, sobre todo cuando se usan de manera combinada, una foto, una imagen directa, sigue despertando la imaginación y nos invita a soñar.

El descubrimiento ha sido posible por el uso de Óptica Adaptativa en el infrarrojo cercano, un difícil y sofisticado método que ha dado ahora sus frutos. De hecho, el primer objeto de masa planetaria y ligado a otro objeto fue descubierto en el año 2004 usando esta misma técnica. La diferencia es que el objeto central no era un verdadero planeta, sino una enana marrón. Esto es, un objeto de apariencia estelar que por su baja masa y temperatura, no es capaz de iniciar y mantener reacciones nucleares en su interior, reacciones que son el origen de la energía que emiten las estrellas durante la mayor parte de sus vidas. Objetos de masa planetaria también han sido descubiertos flotando en mitad de asociaciones estelares muy jóvenes. Tampoco es el primer sistema planetario que se encuentra, pero, como ya se ha dicho, es el primero detectado mediante la obtención de una imagen que permite ver directamente los planetas del sistema.

Aunque fascinante, ninguno de los tres planetas detectados alrededor de HR8799 se encuentra en la zona de habitabilidad. El siguiente

paso, probablemente más allá de nuestras posibilidades tecnológicas actuales, es el descubrimiento de exoplanetas de masa similar a la Tierra (todavía no se ha encontrado ninguno) localizados a una distancia de su estrella central que permita la presencia de agua líquida.



■ El sistema planetario alrededor de la HR8799 (V342 Peg, una estrella variable de tipo espectral A5V, localizada a unos 40 pc o 130 años-luz de distancia). Créditos: Keck/Gemini/C. Marois.

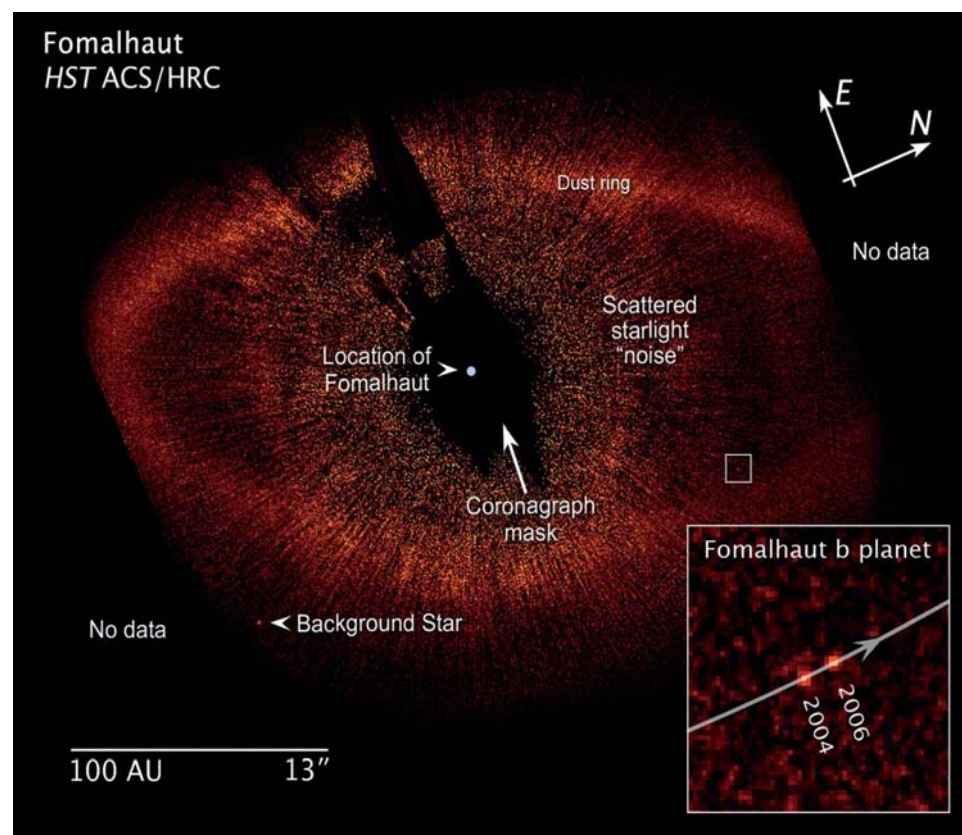
Fomalhaut: el ojo del gato nos hace un guiño

Otro planeta... observable en luz visible, en el rango óptico. En esta ocasión, con el Hubble Space Telescope. Alrededor de nuestro viejo conocido Fomalhaut, uno de los «Cuatro Grandes», las cuatro estrellas prototípicas de ejemplo de disco debris.

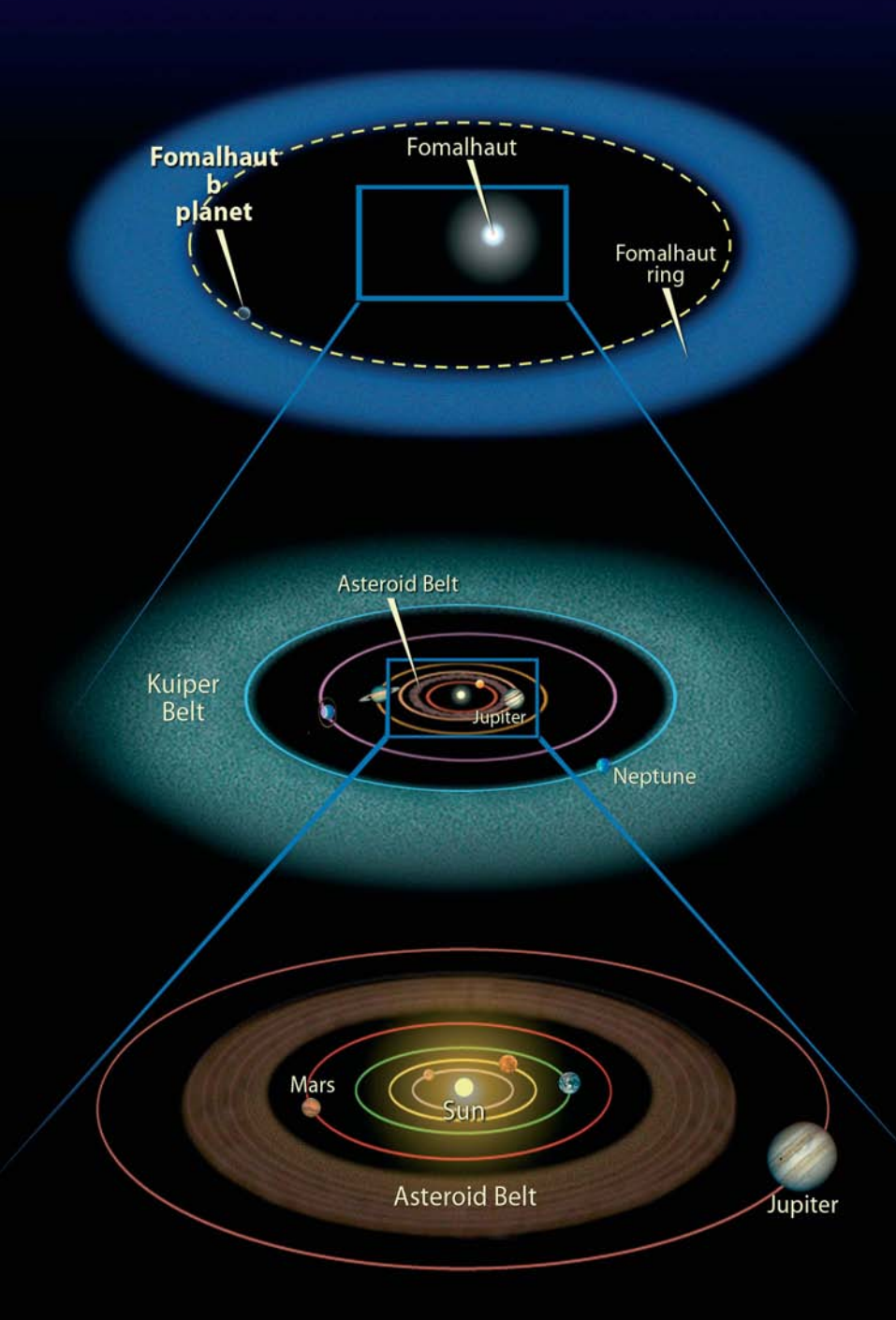
La técnica usada en esta ocasión es imagen directa en el rango óptico del espectro electromagnético (el que vemos los seres humanos). Sin embargo, debido a que la luz de la estrella es muchísimo más intensa que la del disco o del planeta, se suprime parcialmente mediante el uso de una máscara interpuesta en el camino óptico dentro del telescopio,

denominada coronógrafo. La naturaleza planetaria del objeto se confirma debido al movimiento orbital del mismo en torno a la estrella.

Paul Kalas, un amigo y colega, lleva años estudiando los discos de debris. Se pensaba que Fomalhaut contenía, además, un planeta, debido a la falta de coincidencia entre la posición de la estrella y el centro geométrico del disco. Ahora su existencia se confirma. ¡Felicidades, Paul!

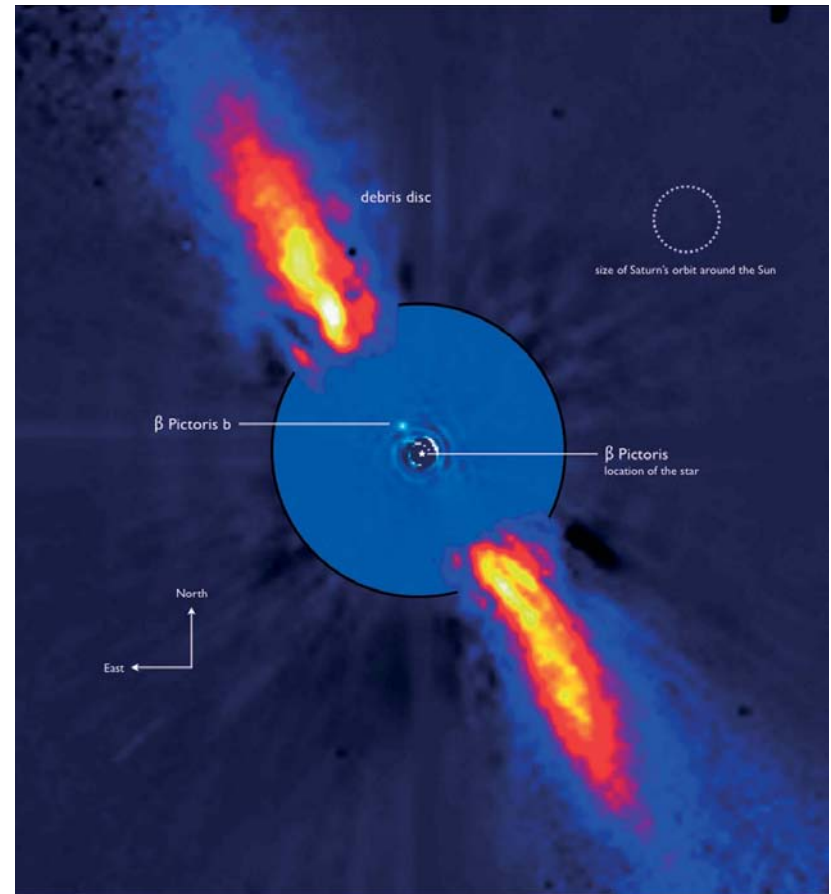


■ Créditos: NASA, ESA, P. Kalas, J. Graham, E. Chiang, E. Kite (University of California, Berkeley), M. Clampin (NASA Goddard Space Flight Center), M. Fitzgerald (Lawrence Livermore National Laboratory), K. Stapelfeldt y J. Krist (NASA Jet Propulsion Laboratory).

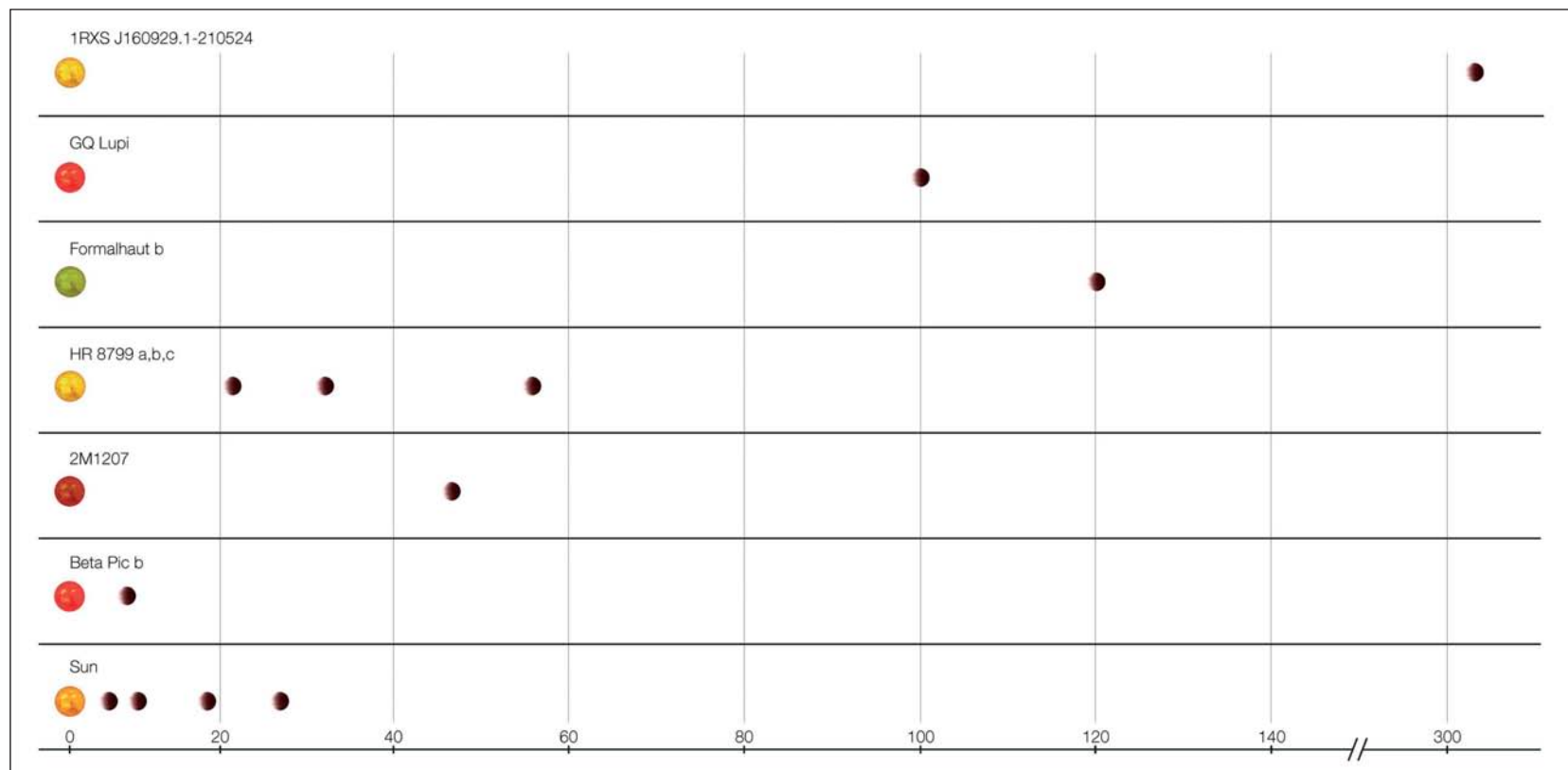


■ Comparación del Sistema Solar con el sistema planetario de la estrella Fomalhaut. Créditos: HST/NASA/ESA.

El planeta de la estrella Beta Pictoris y el tamaño de los diversos sistemas planetarios



■ Otro más. Más de 20 años después del descubrimiento de su disco exozodiacal, el primero identificado a mediados de los años 80, se demuestra la existencia de un planeta cerca de la estrella. Imagen tomada con el VLT (créditos ESO). En realidad es una imagen compuesta. La parte más externa fue tomada con el 3,6 metros del Observatorio de La Silla, mientras que la interna fue tomada con VLT/NAOS, el sistema de óptica adaptativa de uno de los telescopios de 8 metros. El nuevo planeta-candidato está a unas ocho unidades astronómicas y es más de mil veces más débil que la estrella. La edad es de unos 12 millones de años. Créditos: ESO, y A.-M. Lagrange, G. Chauvin y D. Rouan.



■ Comparación de diversos sistemas planetarios cuyos exoplanetas han sido observados directamente, con el Sistema Solar. El diagrama, por simplicidad, solo incluye los cuatro gigantes gaseosos (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno). El eje horizontal muestra la distancia en unidades astronómicas. Créditos: ESO.

Biomarcadores: vida en la distancia

¿Cómo se puede identificar la presencia de actividad biológica más allá de los confines del Sistema Solar? Obviamente, los más de 300 exoplanetas descubiertos hasta ahora no pueden ser visitados por misiones que crucen los espacios intersidiales: el tiempo requerido y la tecnología necesaria, aún por desarrollar, no lo permiten.

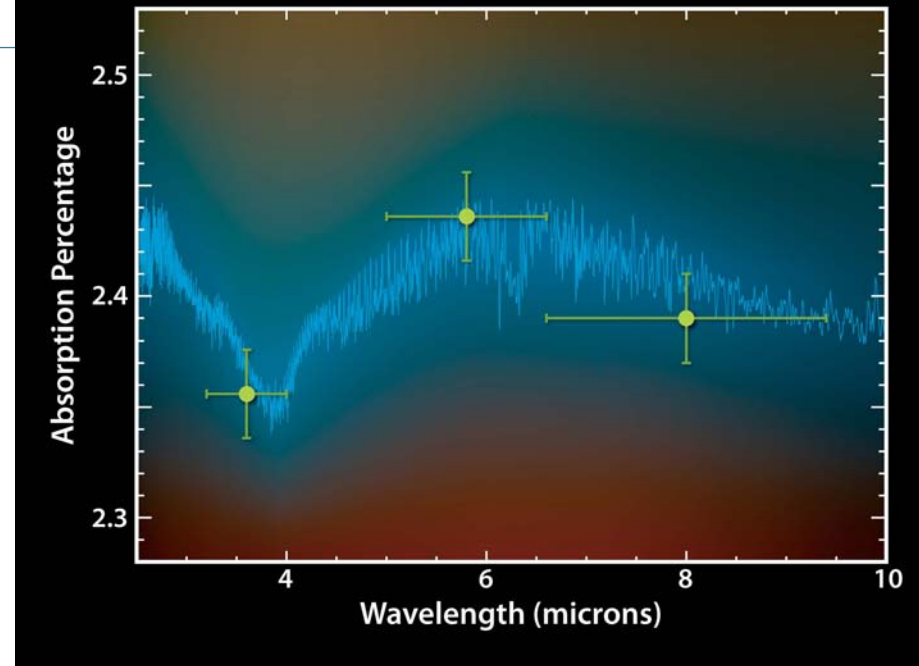
De hecho, los exoplanetas descubiertos hasta ahora son bien distintos de la Tierra o del resto de los planetas interiores del Sistema Solar. Son gigantes gaseosos que orbitan preferentemente (debido a las técnicas utilizadas para realizar sus avistamientos) próximos a sus estrellas. De hecho,

el exoplaneta menos masivo encontrado alrededor de otra estrella tiene una masa de unas 4,2 veces la masa de nuestro planeta.

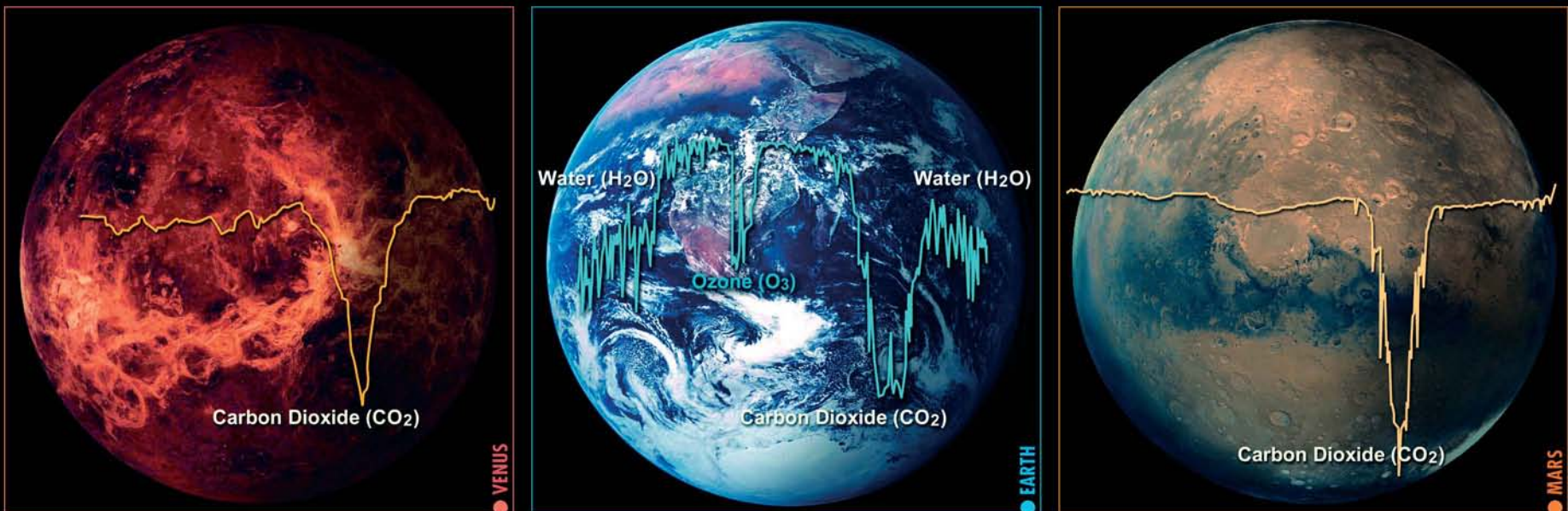
Sofisticadas técnicas de observación han permitido la obtención del espectro de algunos de estos planetas, como es el caso de HD189733b. En realidad se tienen medidas tomadas en diferentes bandas fotométricas, imágenes con diferentes colores. Es la comparación con un espectro teórico (línea azul en el diagrama adjunto) lo que indica la presencia de una banda de absorción debida a vapor de agua. En este mismo planeta se ha detectado, usando otro rango de longitudes de onda, metano, monóxido y dióxido de carbono.

¿Sería posible, una vez identificados estos compuestos químicos, detectar vida en planetas terrestres? La respuesta es un sí condicional. La actividad biológica deja una impronta directa, muy débil, en el espectro de nuestro planeta. Sin embargo, es más sencillo buscar indicadores secundarios en su espectro, que pongan de manifiesto inestabilidades termodinámicas (la presencia de compuestos químicos mutuamente excluyentes) que denoten que existe actividad biológica que afecta de manera global a la atmósfera que produce el espectro.

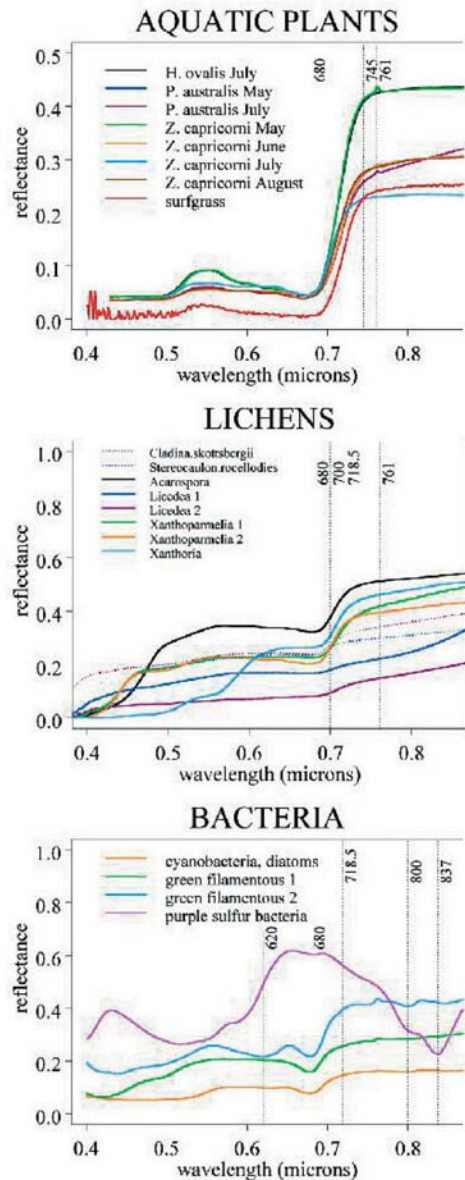
En la actualidad se encuentran sobre el tablero de diseño ambiciosas misiones, que no volarán antes de 15 años, tales, como el Terrestrial Planet FinderT, de NASA, o la misión Darwin, cuyo objetivo final es detectar vida fuera del Sistema Solar. Darwin sería capaz, después de intensas y complejas búsquedas que implican una técnica denominada interferometría, de obtener un espectro de baja resolución de un planeta tipo terrestre y, de existir, proporcionar evidencias de la presencia de vida en dicho planeta. Estas misiones se encuentran en suspenso y es posible que tengamos que esperar incluso varias décadas para saber la respuesta a si estamos o no solos en el Universo.



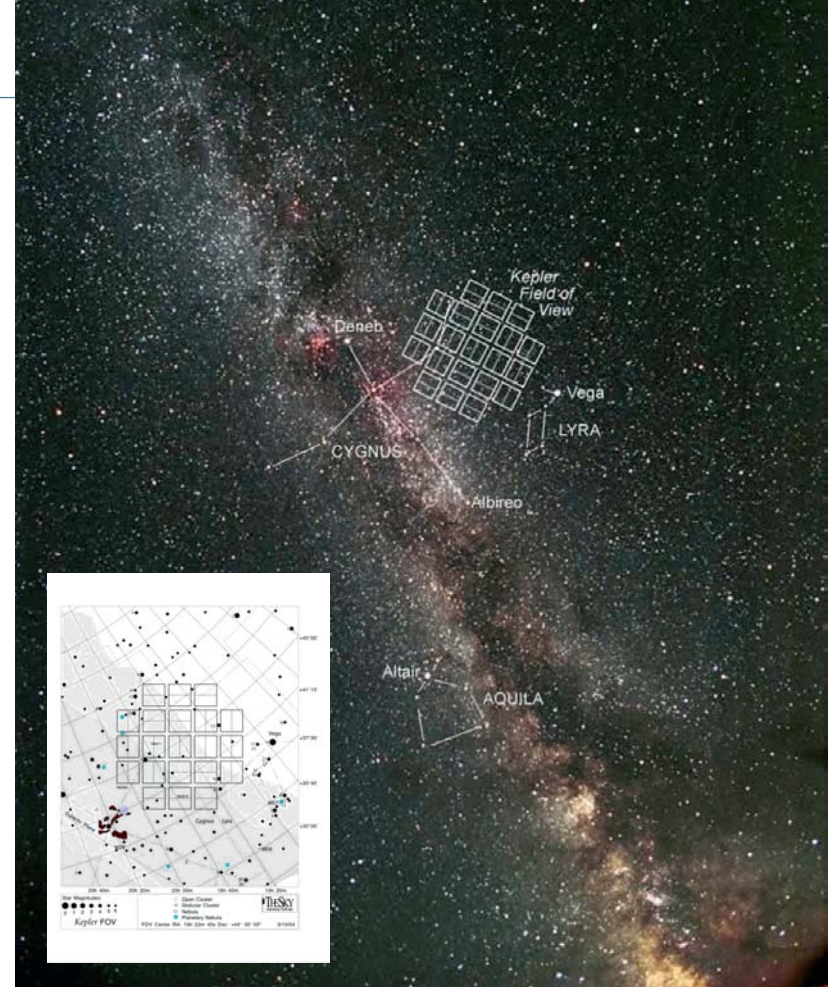
■ El espectro del exoplaneta HD189733. Créditos: ESA, NASA/ JPL-Caltech/G. Tinetti (Institute d'Astrophysique de Paris, University College London).



■ Los tres «mellizos»: Venus, la Tierra y Marte. Superpuestos, los espectros infrarrojos en baja resolución de los tres planetas. En los tres domina el dióxido de carbono, a pesar de su presencia marginal en la atmósfera de nuestro planeta. Sin embargo, en el espectro de nuestro planeta también se pueden apreciar características que corresponden a la presencia de agua y ozono, que no se encuentran en los otros dos planetas.



■ Espectros reflectantes calculados por Nancy Y. Kiang y colaboradores, correspondientes a plantas acuáticas, líquenes y bacterias (que no poseen funciones fotosintéticas).



■ Localización en el cielo de los campos que observará Kepler con sus 21 detectores. Créditos: NASA/Kepler/Carter.

Desde otro brazo de la Galaxia

La Vía Láctea, nuestra galaxia, tiene forma espiral y contiene estructuras bien diferenciadas. Un núcleo con una gran densidad de polvo, que impide acceder visualmente a la parte más central, donde se supone que habita un agujero negro supermasivo. Un disco donde se concentra gran parte de su masa, y que se caracteriza por sus brazos en espiral y población estelar joven. Estos brazos en espiral nacen de una barra central. Finalmente, existe una población estelar más dispersa y vieja, que constituye el halo.

El Sol, y con él, nuestro sistema planetario, está localizado en un brazo menor denominado Brazo de Orión o la Espuela de Orión por la proximidad a la nebulosa del mismo nombre (a unos 400 pársec, o unos 1500 años-luz).

La imagen muestra parte de la Vía Láctea, en la dirección de la constelación del Cisne (las estrellas Deneb y Albireo, que describen parte del mismo, aparecen claramente en la región central). Otra estrella muy conocida, Vega, se encuentra desplazada respecto al plano que describe la galaxia. Justamente en este espacio es donde la misión espacial Kepler ha iniciado su búsqueda de planetas extrasolares mediante el método de los tránsitos planetarios. Se espera que, debido a su precisión fotométrica, Kepler sea capaz de detectar planetas tipo terrestre orbitando alrededor de estrellas similares al Sol. Sin embargo, este es un método indirecto y una verdadera imagen tendrá que esperar al menos hasta la puesta en marcha de la misión Darwin, de la Agencia Espacial Europea, que no está aprobada y sin fecha de lanzamiento.

En el centro de la Vía Láctea

¿Sería posible la existencia de un sistema planetario como el nuestro en las proximidades del centro de la Galaxia, de la Vía Láctea? Y de ser así, ¿sería ese ambiente compatible con la vida? ¿Cómo se observaría desde las intermediaciones?

Nuestro acceso observacional al centro de nuestra galaxia está limitado por el hecho de que el plano de la misma contiene una cantidad ingente de polvo que, aunque muy poco denso, dadas las extraordinarias distancias (unos 25 000 años-luz, o una cuarta parte de un trillón de kilómetros) bloquea la radiación electromagnética que se emite desde allí. Sin embargo, este material absorbe la luz de manera diferencial, mostrando «apetito» por los fotones más energéticos del espectro visible (los más azules). A pesar de ello, con instrumentación adecuada podemos escudriñar qué se esconde tras estas nubes de material, qué hay junto al inmenso agujero negro central que domina gravitacionalmente a nuestra galaxia.

Y lo que hay son estrellas. Un ingente número de ellas. Cientos, miles o decenas de miles de estrellas por año-luz cúbico. Estrellas azules, muy masivas, junto a un grandísimo número de estrellas de tipo solar y mucho menos masivas que el Sol (aproximadamente un 90% de todas las estrellas tienen menos masa). Tan juntas llegan a estar que se afectan directamente las unas a las otras: tanto por acción gravitacional, jugando un curioso juego de billar, como por los intensos vientos estelares.

En este exótico ambiente, es posible que una fracción significativa de ellas pudiera formar sistemas planetarios. Después de todo, los planetas se forman a partir del material presente en discos circunestelares, y estos son

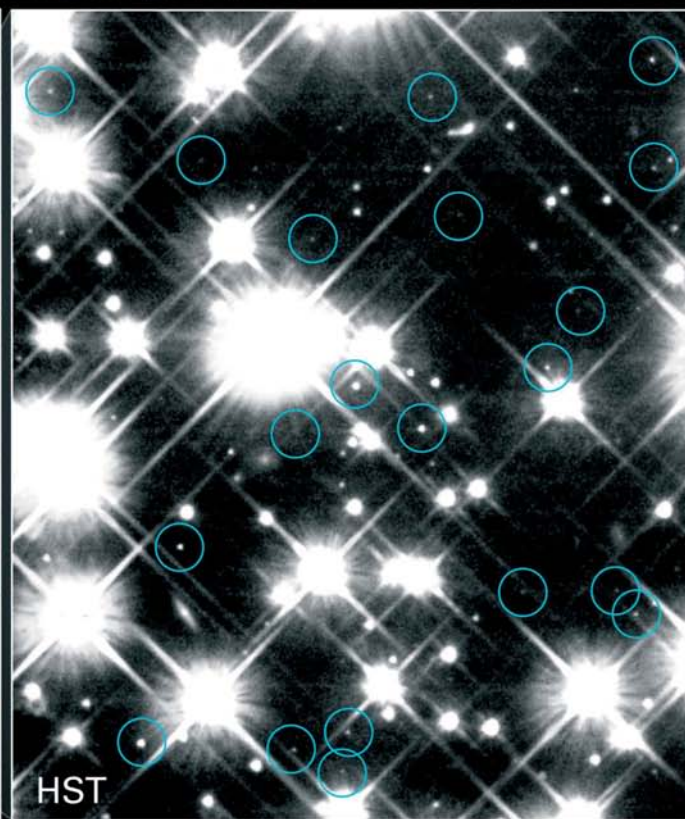
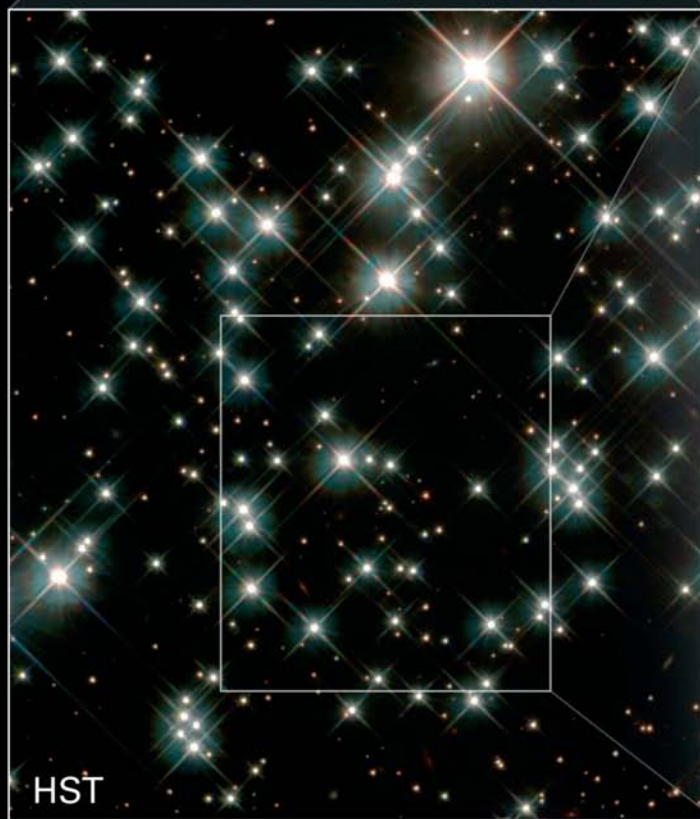
subproductos normales de los procesos de formación estelar. Sin embargo, la promiscuidad en la que habitan estas cohortes de estrellas es tal que tal vez el proceso de formación planetario se vea afectado por las estrellas compañeras. Los intensos vientos pueden arrancar literalmente el material circunestelar; los intensos campos de radiación energética provenientes de las estrellas calientes pueden implicar las mismas consecuencias; pasos cercanos de otras estrellas pueden conllevar la destrucción del disco; o, mucho peor, la evolución estelar puede dictar sus leyes, mediante catastróficas explosiones de supernovas en las proximidades.

Sí, el gran número de estrellas muy masivas implica que cada pocos cientos o miles de años (irrelevante desde el punto de vista de las escalas temporales implicadas en evolución estelar) alguna de ellas se autodestruya en una explosión de supernova, al haber consumido todas sus fuentes energéticas (fusiones termonucleares en el interior estelar) que sostienen su

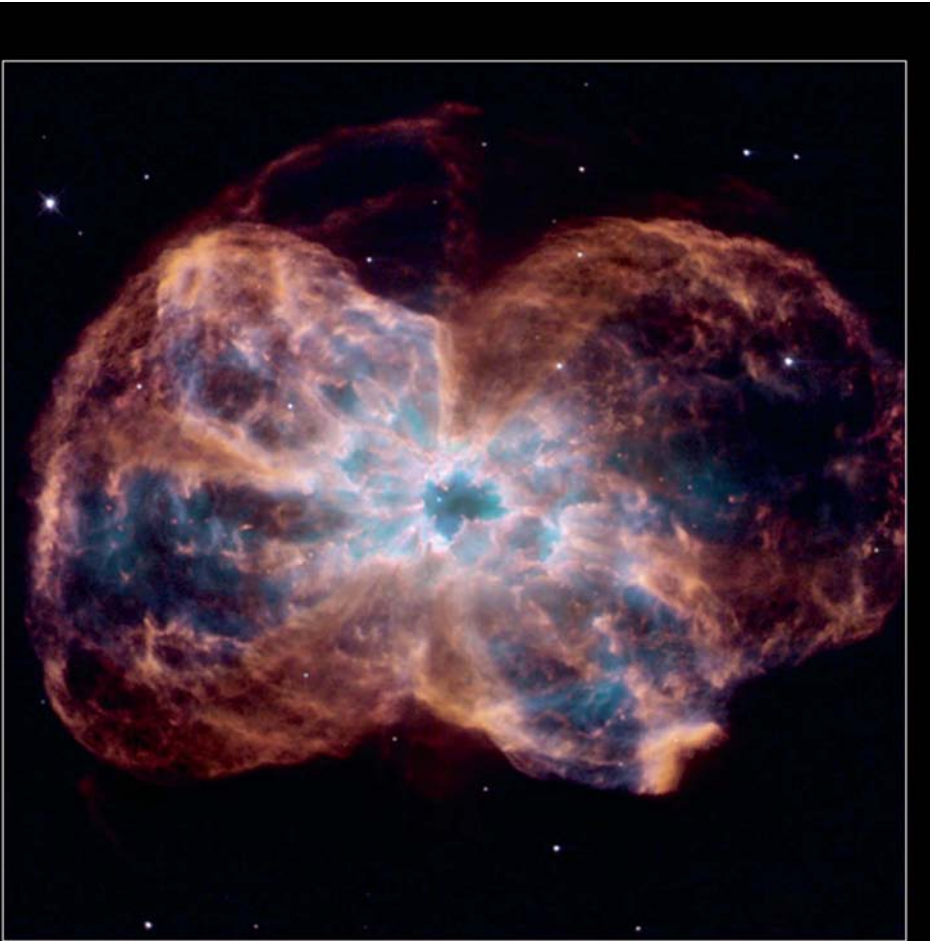


■ A menos de 100 años-luz del centro de la Galaxia (localizado a 25 000 años-luz de la Tierra) se encuentra una de las asociaciones estelares más jóvenes, masivas y compactas: el cúmulo de Arches. Unas 150 estrellas pertenecientes a esta asociación se encuentran entre las más brillantes de toda la Galaxia. La imagen fue tomada con el Hubble Space Telescope y su cámara infrarroja NICMOS, capaz de penetrar el material interestelar presente entre nosotros y el centro galáctico. Créditos: NASA, ESA y D. Figier.

■ Montaje de fotografías del cúmulo globular M4, tomadas con el telescopio de 0,9 metros de Kitt Peak National Observatory (arriba) y con el instrumento WFPC2 a bordo del HST (unas 20 horas de tiempo de exposición para la de la izquierda y unas fantásticas 178 horas para la mostrada a la derecha). M4 está localizado a unos 5600 años-luz de la Tierra, y contiene un elevado número de estrellas poco masivas, incluyendo enanas blancas, lo que ha permitido derivar la edad del cúmulo de manera muy precisa, 12-13 miles de millones de años. Créditos de las imágenes: NASA, ESA y H. Richer (imagen del HST) y NOAO/AURA/NSF.



material. Así, el núcleo central colapsa de manera súbita y las capas más externas son expelidas a velocidades extraordinarias. La Némesis de los cercanos sistemas protoplanetarios se acerca: el frente de choque barre literalmente todo el material de las estrellas cercanas, menos masivas, destruyendo toda subsecuente posibilidad de crear planetas.



■ La nebulosa planetaria NGC2440, localizada a unos 4000 años-luz de la Tierra, y que contiene en su centro la enana blanca más caliente conocida hasta el momento, con una temperatura superficial de unos 200 000 grados centígrados. Créditos: NASA, ESA, y K. Noll.

Aunque el sistema planetario resista, bien porque los planetas ya se hayan formado y puedan conservar sus atmósferas, bien porque la estrella se encuentre lo suficientemente distante como para que el choque no sea lo bastante violento como para destruir los discos protoplanetarios, el letal efecto de la radiación tendrá sus consecuencias. Rayos gamma y X de alto poder energético (incluso la radiación ultravioleta), o partículas elementales con altísima velocidad esterilizarían, literalmente, el planeta. En efecto, una belleza terrible la del centro de la Galaxia.

En el extremo opuesto, tanto en localización como en evolución, se encontrarían los cúmulos globulares. Densas asociaciones estelares, que incluyen también miles de miembros, se caracterizan por encontrarse lejos del plano de la galaxia y por el tipo de población que contienen, estrellas rojas y poco masivas, indicación clara de que se trata de sistemas muy viejos, de hasta 10 000 millones de años... Sin embargo, sus densidades son también mucho más altas que el entorno solar. Así, en cuatro años-luz solo hay una estrella, el propio Sol, cuando los cúmulos globulares tienen tamaños de ese orden de magnitud. La visión desde allí tiene que ser fascinante: un cielo verdaderamente cuajado de estrellas, como un tapiz que apenas deje huecos en su entramado. Habría también alguna nebulosa planetaria dominando el cielo, el glorioso y más tranquilo final de las estrellas de masa intermedia, cubriendo una gran parte del mismo. Como penalización, los hipotéticos habitantes de este planeta no tendrían acceso al resto del Universo: los hermanos siderales de su estrella ocultarían en la práctica el resto de la galaxia y, por supuesto, la realidad extragaláctica.

Érase una vez una galaxia espiral

Los árboles no permiten ver el bosque... Eso mismo ocurre con las estrellas y las nubes de polvo y gas que se asientan, primordialmente, en el plano de nuestra galaxia. Ya que nosotros nos encontramos cerca de ese plano, la vemos de canto y somos incapaces, en principio, de distinguir estructuras, salvo un halo de estrellas viejas y frías y una gran concentración de estrellas jóvenes en el núcleo. Pero, ¿cómo es nuestra galaxia?, ¿dónde está localizado nuestro sistema planetario?, ¿cómo se vería desde una galaxia cercana?

Entre los grandes observatorios espaciales de la agencia espacial americana NASA, destaca por su producción científica y por la calidad de sus imágenes el telescopio Spitzer, que funciona en el rango del infrarrojo, una radiación electromagnética que está caracterizada por tener

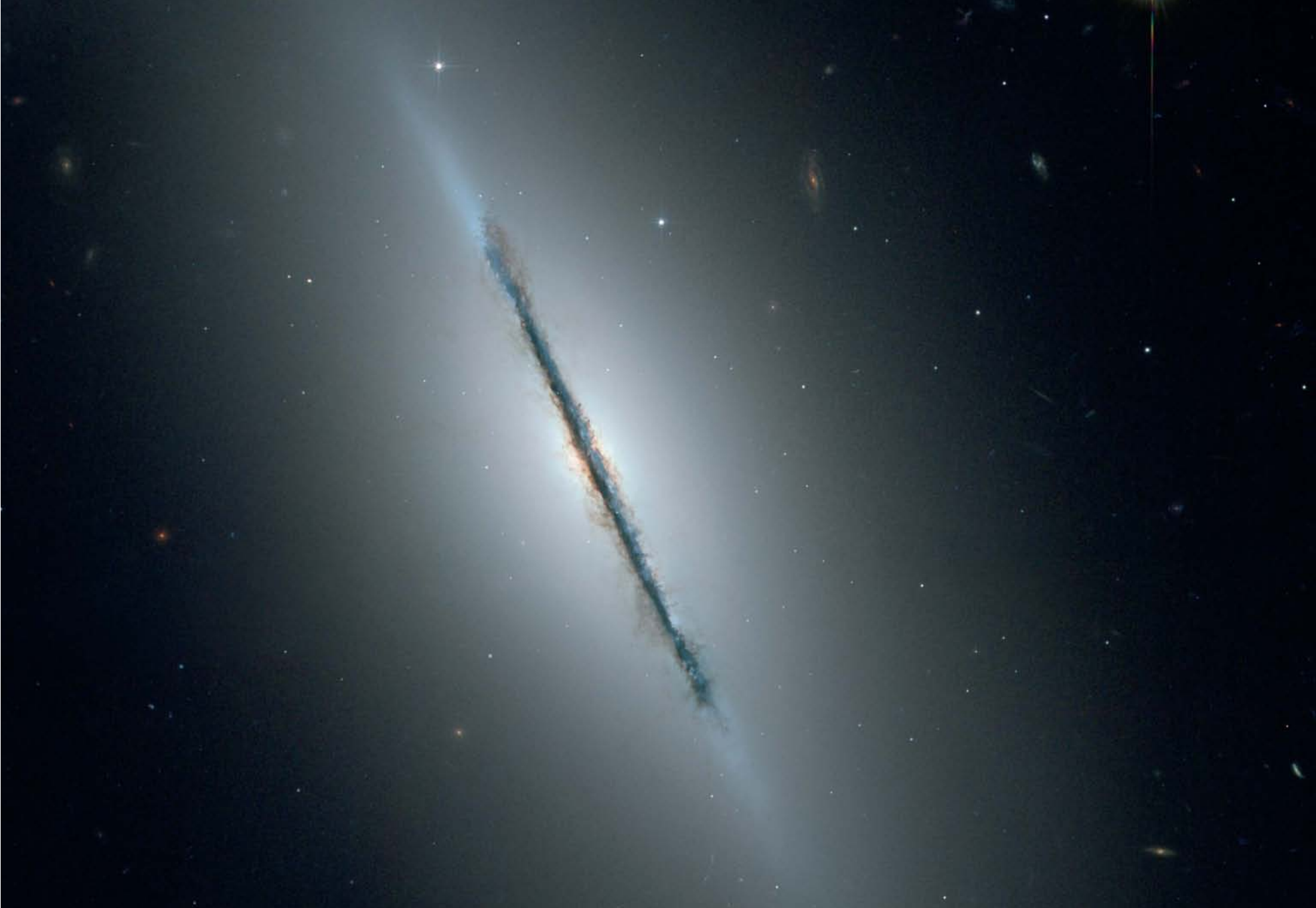


■ La galaxia espiral NGC 1288, en la que recientemente se ha descubierto una supernova (SN2006dr). La fotografía corresponde a una superposición de datos tomados con uno de los cuatro telescopios VLT en varios filtros (B, V, R, I y H α). Créditos: ESO y H. Boffin.

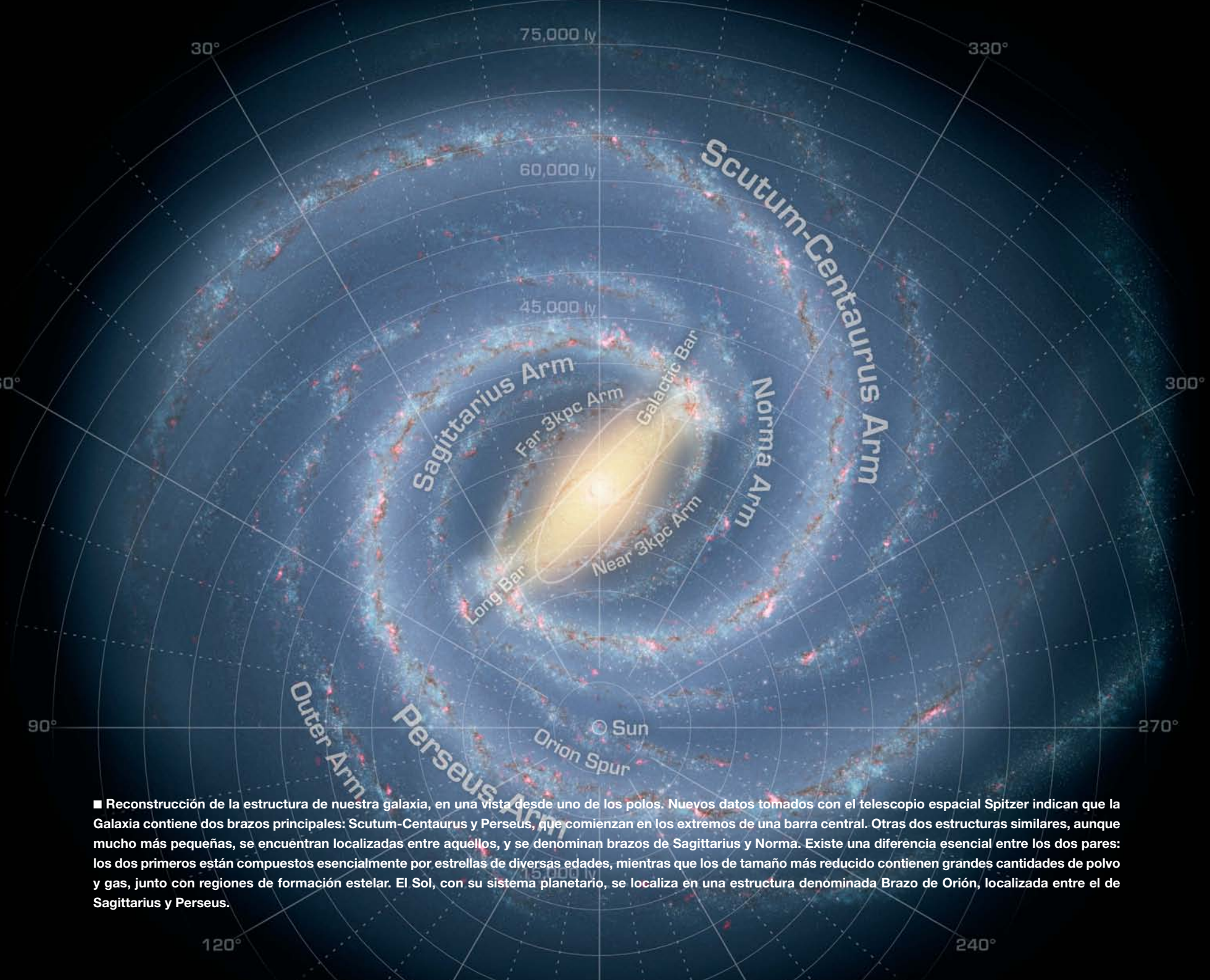
una longitud de onda más larga que el visible y estar relacionada con la temperatura del objeto que la emite (o la absorbe). Debido a que la luz visible interactúa con el polvo que se encuentra localizado principalmente en el plano de la galaxia, siendo absorbido, no es una herramienta adecuada para intentar trazar la estructura de la misma, especialmente para objetos moderadamente lejanos. Sin embargo, la absorción de infrarrojo es mucho más reducida (menos cuanto más larga o «roja» es la longitud de onda). Por tanto, Spitzer, que utiliza esta propiedad, ha permitido verificar que en realidad la Vía Láctea solo tiene dos brazos principales (de-

nominados Scutum-Centaurus y Perseo), en vez de cuatro (los anteriores más Sagittarius y Norma), como se creía hasta ahora.

El Sistema Solar está localizado a unos 25 000 años-luz del centro de la Galaxia, en medio de los dos brazos principales, pero en las proximidades de una estructura de menor entidad que recibe el nombre de Brazo de Orión. Dado el brillo intrínseco del Sol, no sería posible distinguirlo desde una galaxia cercana ni con los telescopios más potentes que existen en la actualidad.



■ La galaxia espiral NGC 5866, que se encuentra prácticamente alineada con su plano ecuatorial orientado hacia nosotros. La imagen fue tomada con el Hubble Space Telescope y el instrumento ACS. Aunque su halo, formado esencialmente por una población de estrellas poco masivas y viejas, se puede apreciar con facilidad, la estructura de sus brazos espirales permanece oculta. Un fenómeno similar nos ocurre a nosotros con nuestra galaxia, la Vía Láctea. Créditos: NASA y ESA.



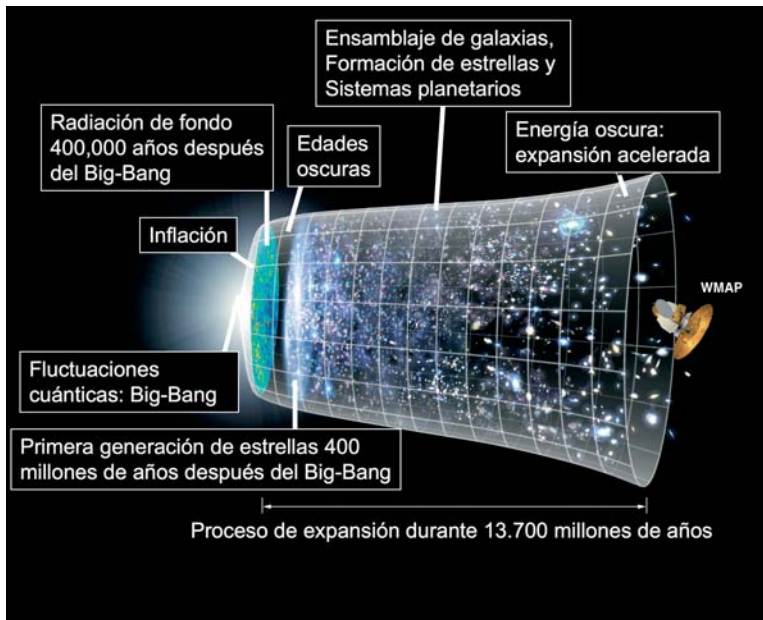
■ Reconstrucción de la estructura de nuestra galaxia, en una vista desde uno de los polos. Nuevos datos tomados con el telescopio espacial Spitzer indican que la Galaxia contiene dos brazos principales: Scutum-Centaurus y Perseus, que comienzan en los extremos de una barra central. Otras dos estructuras similares, aunque mucho más pequeñas, se encuentran localizadas entre aquellos, y se denominan brazos de Sagittarius y Norma. Existe una diferencia esencial entre los dos pares: los dos primeros están compuestos esencialmente por estrellas de diversas edades, mientras que los de tamaño más reducido contienen grandes cantidades de polvo y gas, junto con regiones de formación estelar. El Sol, con su sistema planetario, se localiza en una estructura denominada Brazo de Orión, localizada entre el de Sagittarius y Perseus.



■ La galaxia espiral NGC 1300, en otra imagen del HST. Dado que su orientación relativa a nosotros es de cara, se aprecian perfectamente las diferentes partes de la misma, incluyendo la barra central y los dos brazos en espiral que nacen de los extremos. La Vía Láctea podría tener una disposición similar, salvo que tendría brazos adicionales de menor tamaño que los principales. Desde la distancia, es imposible distinguir estrellas individuales análogas al Sol y, por supuesto, sistemas planetarios.

Los confines del Universo

■ El cúmulo de galaxias Abell 1689, uno de los más masivos conocidos, nos permite tener acceso a un Universo mucho más lejano, a galaxias que se encuentran mucho más distantes y que son, por tanto, mucho menos luminosas y se nos presentan con un tamaño mucho menor. Ello es debido al fenómeno de la lente gravitacional, una consecuencia de la teoría de la relatividad general. La ingente cantidad de masa presente en Abell 1689 desvía la luz que proviene de las galaxias situadas detrás, incluso hasta $z=7$ (una forma algo arcana que los cosmólogos usan para medir las distancias), en los confines observables del Universo, en su pasado remoto. Por tanto, actúan de hecho como un gigantesco telescopio de millones de años-luz de apertura. En la imagen, tomada con la cámara ACS a bordo del HTS, se ven decenas de asociaciones que contienen trillones de estrellas, indistinguibles de forma individual. ¿Qué sistemas planetarios contendrán?



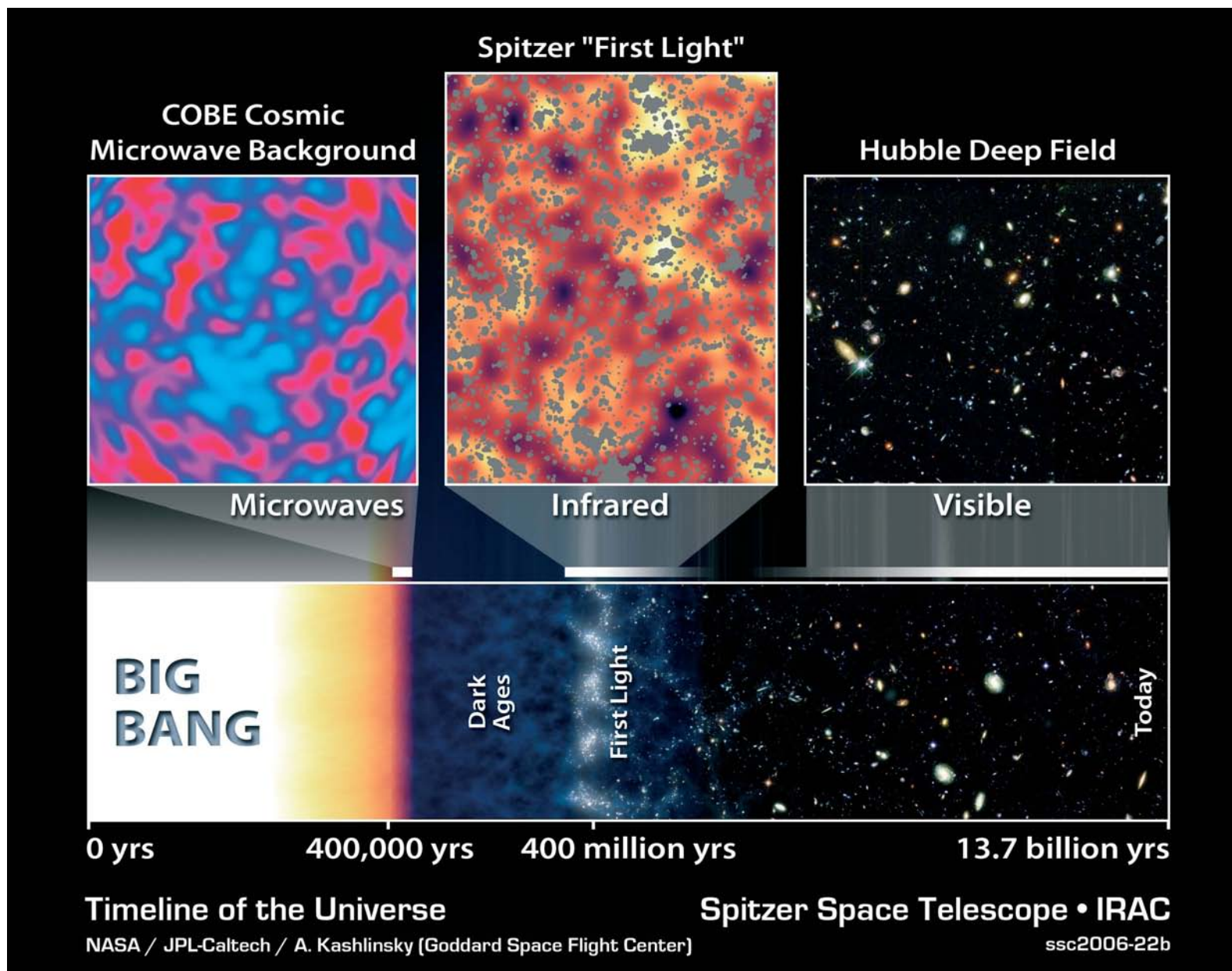
La aventura del ser humano ha transcurrido solamente durante una pequeña fracción de la vida del Universo: menos de la diez milésima parte. Y siempre en el mismo escenario, la Tierra, que tiene un tercio de la edad del Cosmos. Somos un brevísimo capítulo en la historia del planeta, y parecería que somos del todo insignificantes. Pero la ciencia y la tecnología nos han proporcionado la capacidad para cambiar el destino del planeta, o al menos de su biosfera y de su climatología.

Con las magníficas imágenes desplegadas en este libro he querido mostrar la belleza de nuestro planeta, y su extremada fragilidad. Esperemos que ayude a que nos concienciamos de la necesidad de evitar dilapidar sus recursos, de cuidar su integridad y equilibrio. Es, sobre todo, una decisión que cada uno de nosotros toma a nivel individual. Por nuestro futuro, pero también por el ya acuciante presente.

David Barrado Navascués
12 de julio de 2010

Epílogo

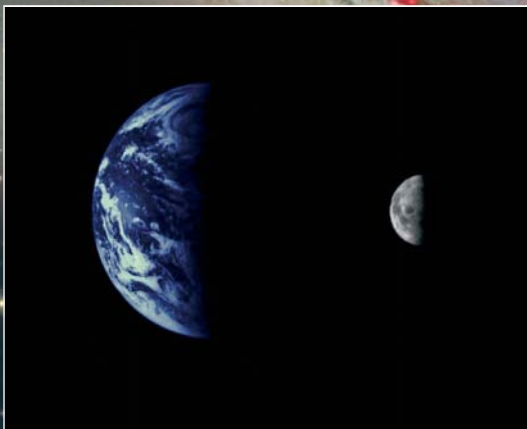
■ Desde el inicio del Universo hasta la actualidad, en una representación gráfica que muestra el Big-Bang, el proceso inicial de inflación y la aparición de galaxias, estrellas y planetas. Créditos: equipo científico de WMAP/NASA.



■ Otra representación de la evolución del Universo, que ilustra cómo se nos aparece en distintos momentos y las técnicas idóneas para su estudio en cada uno de ellos. La escala temporal en el eje horizontal es logarítmica.



1.



3.

