

# EL CIELO CAE SOBRE NUESTRAS CABEZAS

Manuel CATALÁN MOROLLÓN

Lluís CANALS ROS



## Introducción



ROBABLEMENTE la investigación del espacio tuvo su inicio cuando, mirando al cielo, fuimos capaces de apreciar a simple vista sucesos que de forma repetitiva se reproducían en el tiempo. Poco a poco, a este descubrimiento sencillo le sucederían otros que mostraban la existencia de un orden en el infinito.

Es sorprendente que este conocimiento del universo alcanzado decenas de siglos antes de nuestra era se adelanta mucho al momento en el que el ser humano toma conciencia de las leyes que gobiernan algo tan cercano a él como es el interior de nuestro propio planeta.

Las normas que rigen el movimiento de los objetos celestes en sus órbitas fueron enunciadas por Kepler a principios del XVII y, junto con la segunda ley de Newton, hicieron posible que a finales de los años 50 del siglo XX se pusiera en órbita el primer satélite artificial de la historia. A partir de ese momento y en una sucesión extremadamente rápida, tras instalar sensores en estos nuevos vehículos, se alcanza desde el espacio un conocimiento profundo de cómo funciona el interior y el exterior de la Tierra.

En julio de 1969 conseguimos pisar nuestro propio satélite, la Luna. El ser humano parece dueño de su presente y vislumbra un futuro prometedor.

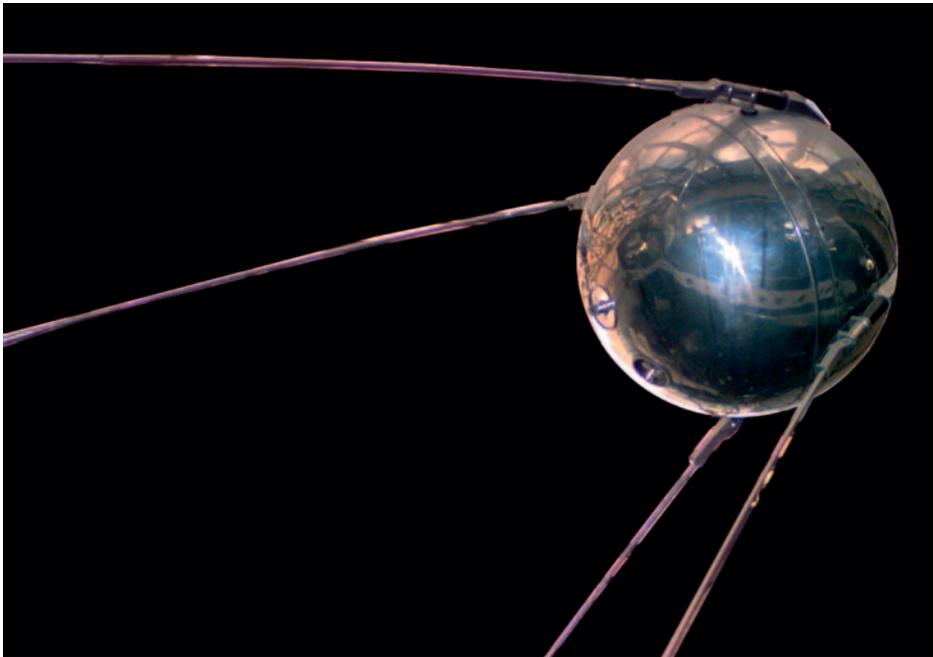
Aunque la realidad no ha sido exactamente así. Por vez primera en la historia de la humanidad somos capaces de controlar procesos complejos —telecomunicaciones, transportes interoceánicos— e incluso actuar sobre los naturales —desviar cauces de ríos o crear pantanos—. Sin embargo, también por vez primera podemos influir en la naturaleza, aunque de manera negativa,

incrementando los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, o el número de objetos inoperativos en órbita, comúnmente conocidos como «basura espacial».

### La problemática del espacio. Las zonas especialmente protegidas

Desde aquel 4 de octubre de 1957 en que se pone en órbita el *Sputnik*, se cuentan por miles los satélites artificiales lanzados al espacio. En concreto, este número se aproxima a los 3.500, de los cuales se encuentran actualmente en funcionamiento unos 600. Muchos de los 2.900 restantes aún permanecen orbitando en torno a nuestro planeta como masas inertes.

Es fácil tener la sensación de que en un espacio tan enorme, infinito sin caer en la exageración, el hecho de que se acumulen estos restos no debería plantear un problema. La realidad no es así. Los satélites artificiales son objetos situados en una órbita estable, cuyas características —distancia a la Tierra, inclinación respecto al Ecuador...— no son casuales o elegidas al azar. La órbita es un parámetro importantísimo que está conectado íntimamente con la misión del satélite en cuestión. Por ello, satélites altimétricos destinados a



Réplica del *Sputnik 1*, el primer satélite artificial en el mundo, listo para ser puesto en órbita.  
(Foto: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org))

monitorizar la superficie del océano tienen inclinaciones (1) elevadas para maximizar el tiempo en que lo sobrevuelan. Otros, utilizados como base para definir el sistema de referencia que adjudica a cada punto de nuestro planeta unas coordenadas cartesianas, requieren órbitas sumamente estables. Todo esto fuerza a elegir una órbita lo suficientemente alejada, pero no tanto como para que el satélite no pueda ser observado desde nuestro planeta mediante técnicas tales como la óptica, el radar o la telemetría láser.

Por ello, no todas las zonas del espacio son igual de importantes. A dos de ellas se las considera particularmente relevantes por las misiones espaciales que acogen, y se las denomina «zonas especialmente protegidas». La primera, situada entre 300 y 2.000 km de altura, comúnmente conocida como LEO (*Low Earth Orbit*), acoge a satélites de monitorización de nuestro planeta, algunos de comunicaciones, como los Iridium, así como a la Estación Espacial Internacional.

La otra zona con una especial consideración es la Geostacionaria (GEO). Esta está situada a unos 36.000 km de altura sobre la superficie de la Tierra en el plano ecuatorial (0° de inclinación). En ella, los satélites deshacen la rotación terrestre de modo que siempre se encuentren sobre el mismo punto de la superficie de nuestro planeta. Por esta razón, esta zona es considerada un bien precioso, pues no tiene reemplazo. No existe ningún otro lugar que permita mantenerse permanentemente sobre la misma localización geográfica. Por ello, los países sobre los que se proyecta esta órbita plantearon la posibilidad de que se les reconociese un estatus similar al que ejerce un Estado ribereño sobre su zona económica exclusiva, pero en este caso trasladado a la vertical.

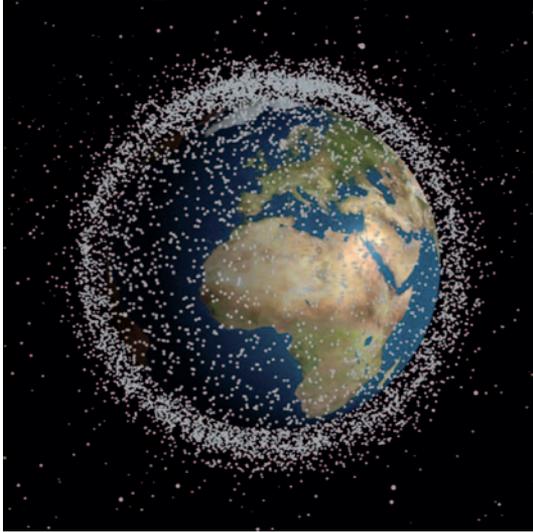
No obstante, ningún objeto geostacionario es capaz de estar permanentemente sobre el mismo punto, como consecuencia de las perturbaciones producidas por el viento solar o por la atracción del Sol y de la Luna. Por ello, aunque podemos corregir esos desequilibrios restituyendo el satélite a su posición mediante maniobras de reposicionamiento, debemos contar con márgenes de seguridad, de modo que el espacio disponible para estos objetos es reducido.

## La basura espacial

Como consecuencia de la actividad desarrollada por el ser humano en el espacio, en nuestro entorno más o menos cercano podemos encontrar satélites artificiales orbitando, que una vez superada su vida útil han quedado inoperativos. También hallaremos cohetes utilizados para situarlos en órbita, así como

---

(1) Inclinación orbital: ángulo que forma el plano orbital del satélite con respecto al plano ecuatorial terrestre.



Recreación artística de la basura espacial orbitando la Tierra. (Foto: [www.elmundo.es](http://www.elmundo.es))

restos consecuencia del choque de algunos de estos objetos y componentes, herramientas, etc., perdidos en el espacio como consecuencia de la actividad realizada en su seno.

El número de estos es enorme. Elementos de tamaño superior a 10 centímetros se calcula que puede haber por encima de 23.000, mientras que de más de un centímetro, unos 700.000, y por debajo de este tamaño se cuentan por millones. Todos ellos se encuentran orbitando y su velocidad es acorde con su distancia de la Tierra. Así, a unos 1.000 km de distancia, la velocidad es de cinco kilóme-

tros/segundo. Obviamente, la energía cinética es muy grande, y por tanto un choque fortuito con un satélite activo podría ser, dependiendo del tamaño del objeto-proyectil, letal o capaz de causar daños considerables.

Una vez acaba la vida útil de un satélite artificial, este debe ser retirado para que no suponga un peligro para el resto de objetos en órbita. La realidad es que no siempre es así, y lo que debería ser una obligación, hoy por hoy tan solo constituye una simple recomendación, que básicamente se resume en dos reglas: 1) este tipo de objetos debe ser extraído de su órbita en un plazo no superior a los 25 años, y 2) si el objeto es extraído y forzada su reentrada en la atmósfera, debe ejecutarse una maniobra que posibilite que el riesgo de ocasionar daños en la superficie no supere la cifra de 1:10.000.

Por otra parte, los restos que producen estos objetos no se reparten de forma uniforme en el espacio, existiendo dos zonas muy pobladas: la correspondiente a los satélites bajos (entre 300 y 2.000 km) y la órbita de los geostacionarios. En resumen, estas áreas se encuentran localizadas en las zonas especialmente protegidas, por lo que su vigilancia y catalogación se ha considerado un asunto de la mayor importancia al poner en riesgo las misiones actualmente activas y comprometer las futuras.

Hasta la fecha son dos los procedimientos que se siguen para la remoción de los objetos inactivos de la órbita original. En el caso de satélites en órbitas bajas, se procede a maniobrarlos forzando su reentrada en la atmósfera. Como consecuencia de la fricción y las altísimas temperaturas, deberían desintegrar-

se. Caso de que, por su tamaño, se alberguen dudas al respecto, se procedería a maniobrarlos de forma que su impacto se produzca en una zona especialmente reservada para ello, al sur del océano Pacífico, alejada de espacios habitados.

Respecto a los situados en órbitas altas, como la geoestacionaria, a fin de respetar esa zona «segura» se procede a situar el objeto en cuestión en una región alejada de ella, donde debe posicionarse en condiciones que aseguren su presencia como objetos inertes (sin combustible, ni carga en baterías). Esta región del espacio es conocida como «órbita cementerio». En ella, el campo gravitatorio terrestre es débil, la fricción atmosférica despreciable y, aunque actúan otros efectos como la radiación solar, podemos considerar las órbitas descritas por estos objetos, una vez en ella, como razonablemente estables, tratándose de una zona amplia en la que el riesgo de colisión es muy bajo. La idea es que la órbita en la que se le sitúe garantice que el objeto no cruce la zona geoestacionaria antes de 100 años.

Como se ha comentado anteriormente, el problema más relevante atañe al hecho de que no existe una normativa que obligue a la extracción del satélite inactivo, tan solo recomendaciones.

Desde octubre de 1957, el número de estos objetos ha ido incrementándose de forma aproximadamente lineal. Eventualmente, estas cantidades se veían súbitamente incrementadas como consecuencia de explosiones o choques. Las explosiones se han ido produciendo de manera periódica, algunas no intencionadas, debido a la presencia de combustible remanente en el objeto ya inoperante; otras lo fueron de forma deliberada, como a comienzos de los años 60 del pasado siglo cuando la Unión Soviética habría explotado satélites al objeto de evitar que cayeran en manos de EE. UU. una vez reentraran en la atmósfera.

También EE. UU. realizó pruebas al objeto de mostrar su capacidad para destruir sus propios satélites en los 80, y continuaron hasta que un acuerdo internacional prohibió la utilización de sistemas anti-satélite. Esta prohibición fue acatada durante unos 20 años, hasta que en 2007 China realizó una prueba antisatélite utilizando como blanco un satélite meteorológico inactivo, el *Fengyun-1C*. Esta fue exitosa, y las autoridades chinas se demostraron a sí mismas y al mundo entero que su nivel tecnológico les permitía destruir mediante un misil un blanco en movimiento orbital a la nada desdeñable distancia de 865 km. La prueba produjo asimismo un efecto nocivo, al incrementar en un 25 por 100 la cantidad de basura espacial. Los fragmentos se dispersaron abarcando un margen muy amplio de distancias, que iba de los 200 a los 4.000 km, contaminando todas las órbitas comprendidas en esa zona y comprometiendo la vida operativa de multitud de satélites durante muchos años.

Poco después, en el año 2009, el satélite americano *Iridium 33* colisionó con el ruso *Cosmos 2251* a una altura de unos 790 km. La colisión se produjo con una velocidad relativa de 10 km/s y generó fragmentos que incrementaron

en un 18 por 100 la población de objetos de tamaño superior a 10 cm. El satélite soviético se encontraba inoperativo y no estaba siendo seguido, por lo que se desconocía su posición. Rusia fue criticada por no haber realizado una maniobra de extracción orbital y por haber mantenido en una de las zonas especialmente protegidas un satélite inoperativo. La realidad es que, tal como indicamos anteriormente, no existe una reglamentación especial para ello, por lo que no estaban obligados a hacerlo. En cualquier caso, aunque así hubiera sido, dicho satélite carecía de capacidad de maniobra al no disponer de un sistema de propulsión.

Existe un acuerdo generalizado en cuanto a la importancia de resolver este problema, y también respecto al hecho de que la solución se compondría de dos fases: una primera destinada a conocer la órbita de estos objetos y, en segunda instancia, una vez conseguida la primera, extraerlos de su actual ubicación. En este sentido, desde mediados de esta década, la Unión Europea ha considerado esta problemática uno de los pilares de lo que constituye su política de *Space Situational Awareness* (SSA), que podría traducirse como «preocupación por la situación espacial», promoviendo la activación de los primeros servicios de vigilancia y seguimiento espacial (SST) (2) mediante una decisión conjunta del Parlamento y el Consejo Europeo en la que estableció el denominado Marco de Apoyo Europeo al SST (EU SST).

El objetivo final consiste en crear y mantener un catálogo propio de dichos objetos, conformando para ello un consorcio formado inicialmente por cinco países: Alemania, Francia, Reino Unido, Italia y España. Estos aportarían un conjunto de sensores; en concreto, dentro de la participación española figuran dos sensores del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA): la Estación de Telemetría Láser (ETL-ROA), situada en la cúpula de su edificio principal, y el Telescopio Fabra-ROA del Montsec (TFRM), pre-Pirineo leridano, dirigido y operado conjuntamente con la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona.

## La Estación de Telemetría Láser

La ETL-ROA emite pulsos de luz verde con una cadencia de 10 Hz. Estos viajan a la velocidad de la luz hasta el satélite, donde son reflejados por sus espejos retrorreflectores. Tras afectar la medida del tiempo de vuelo del valor de la velocidad de la luz, y una vez aplicadas ciertas correcciones, es posible inferir la distancia instantánea al centro de masas del objeto con una precisión de centímetros cuando este es un satélite artificial activo.

---

(2) SST: *Space Surveillance and Tracking*.

El ROA comenzó a utilizar esta técnica a mediados de los años setenta. La posición geográfica de esta estación —al sur de la península Ibérica, la más meridional y occidental de Europa— le permite realizar seguimientos, entre otros, sobre satélites artificiales durante el tramo orbital que sobrevuela el Atlántico Oriental, posibilitando el mantenimiento actualizado de órbitas que de otra forma no podrían ser observadas mediante este procedimiento.

En abril de 2015, al amparo de un proyecto de investigación que supuso realizar modificaciones sobre la configuración original de la ETL-ROA, se comienzan a hacer seguimientos sobre un determinado tipo de objetos: satélites artificiales inactivos, equipados con espejos retrorreflectores. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

A lo largo de 2017 se mantuvo la misma línea de trabajo, incorporando modificaciones que llevaron a participar en un estudio financiado por la UE y gestionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) dentro del Programa Horizonte 2020. El objetivo consistía en analizar el efecto que el incremento de potencia de la fuente láser podía tener en este tipo de seguimientos. Como consecuencia de ello, desde noviembre de 2017 se han incluido dentro de las tareas rutinarias los seguimientos sobre objetos opacos (carentes de espejos retrorreflectores), con lo que se ha incrementado el rendimiento de la estación, al conseguir ecos sobre objetos de 4,6 m<sup>2</sup> a distancias de más de 1.000 km, reforzando de esta manera las capacidades del EU SST.

## El TFRM

En 1957, la Smithsonian Institution inicia un proyecto para establecer 15 cámaras Baker-Nunn por todo el mundo, diseñadas con el objetivo de determinar la órbita de los primeros satélites artificiales. Una de ellas se instaló en el ROA.

Tras estar en servicio hasta el año 1977, pasó a formar parte del Patrimonio Histórico de la Armada, hasta que en el año 2001, con la llegada de la tecnología CCD, se planteó la posibilidad de aprovechar la magnífica calidad de su óptica y mecánica, convirtiéndola en un telescopio de gran campo y con capacidad para múltiples aplicaciones astronómicas. Para ello, el ROA y el Observatorio Fabra acordaron modificar y actualizar este instrumento mediante una colaboración conjunta. Este proyecto de modernización culmina con la puesta en marcha del TFRM en 2010.

Las modificaciones fueron capaces de potenciar ventajas ya inherentes al equipo, como su gran campo de visión (4,4° x 4,4°), e introducir novedades tales como convertirlo en un dispositivo totalmente robotizado con capacidad de ser operado en remoto. Este telescopio dispone de un sistema de control que le permite seguir objetos en cualquier tipo de órbita, disponiendo de un

modo de observación especial mediante el que puede seguir objetos muy poco brillantes al aumentar el tiempo de exposición.

El TFRM realiza actividades de SST de forma rutinaria desde el 2011. Su principal aportación en este campo consiste en la detección de objetos en órbita GEO mediante una estrategia observacional optimizada de exploración y vigilancia. Gracias a su gran campo de visión, el TFRM puede observar casi dos veces cada noche una amplia zona de todo el anillo GEO visible desde su emplazamiento, generando hasta ocho posiciones por cada objeto detectado. Las altas prestaciones de su sistema de control le permiten hacer seguimiento sobre objetos en cualquier tipo de órbita, incluyendo las LEO. Todo ello le ha posibilitado participar en varias campañas de observación para el programa SST de la Agencia Espacial Europea.

A finales de 2017, se le instala una óptica adicional y una cámara CCD sin obturador mecánico, denominada Piggyback, que le permite cubrir un campo de  $5,3^\circ \times 3,5^\circ$ . De esta manera, el telescopio dispone de dos ópticas que comparten la misma montura, por lo que no actúan de forma independiente, observando simultáneamente dos campos separados un ángulo de  $4^\circ$ .

A pesar de su menor apertura, la cámara Piggyback ha mostrado ser muy eficiente al disponer de una tecnología óptica punta. Ello, unido a la afortunada circunstancia de que la magnitud aparente de los objetos en órbitas GEO es tal que pueden ser detectados por esta nueva cámara, hace que el rendimiento de esta cámara alcance, de manera habitual, del 60 al 80 por 100 de los resultados de la cámara principal.

Esta última modificación ha optimizado el telescopio, al restaurar su capacidad para observar objetos LEO y al aumentar notablemente su rendimiento para llevar a cabo el barrido del anillo geoestacionario con dos cámaras. A todo ello habría que añadir la disponibilidad de un *software* de reducción de observaciones avanzado, con lo que el producto final de sus observaciones alcanza precisiones astrométricas del orden de  $0,5''$  en las coordenadas observadas (azimut y altura).

## Conclusiones

El siglo XXI nos muestra cómo el ser humano ha sido capaz de alcanzar hitos tecnológicos inimaginables por nuestros antepasados, y nos ha permitido conseguir una profunda comprensión del funcionamiento de nuestro planeta.

Sobre nuestras cabezas penden amenazas que en otros momentos hubieran pasado inadvertidas por su poca trascendencia, siendo un claro ejemplo las tormentas solares. También otras amenazas, estas creadas por el hombre, como la basura espacial, con capacidad de destrucción de objetos activos que el propio ser humano ha puesto en órbita y que pone en riesgo misiones tripuladas.

A día de hoy, esta amenaza crece constantemente. En algunos momentos, de forma brusca y notable, debido a choques fortuitos o a otras actuaciones difícilmente justificables. Esta realidad ha sido percibida por organismos internacionales que han mostrado su voluntad de controlarla, inicialmente mediante la generación y el mantenimiento actualizado de catálogos de los objetos de mayor tamaño, para así conocer su posición y generar alertas anti-colisión con la debida antelación.

Es justamente en esta etapa en la que el ROA contribuye aportando dos de los sensores con que cuenta nuestro país, dentro del grupo de actividades SST que gestiona la UE. En un futuro quizás no muy lejano, seremos testigos de la puesta en marcha de la segunda fase de este proceso, consistente en la extracción de estos objetos aún en órbita sin necesidad de aguardar a su caída natural como consecuencia de la fricción atmosférica.

