

LAS APLICACIONES ACTUALES Y FUTURAS DE LA INVESTIGACIÓN ESPACIAL

David RODRÍGUEZ COLLANTES

Manuel Ángel SÁNCHEZ PIEDRA



Introducción



OS satélites artificiales juegan un papel fundamental en nuestra vida cotidiana, ya que están íntimamente relacionados con actividades que realizamos a diario. ¿Cómo podríamos si no predecir la meteorología?, ¿qué haríamos sin los satélites de navegación para poder ubicarnos? o ¿cómo podría tener comunicaciones en tiempo real el tráfico marítimo?

Especialmente, hay que destacar el protagonismo que ha llegado a alcanzar el Sistema Global de Navegación por Satélite, más conocido por sus siglas en inglés GNSS (1), el cual, además de ayudar al posicionamiento en tiempo real de forma global, contribuye con otras misiones espaciales y en multitud de aplicaciones científicas.

El Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) trabaja en el campo de la investigación espacial desde sus inicios, cuando se instaló la cámara Baker-Nunn para el seguimiento de satélites artificiales. Ha colaborado también en el mundo científico con técnicas como la telemetría láser o en diferentes estudios mediante el análisis de datos GNSS.

(1) *Global Navigation Satellite System*. Incluye GPS, Galileo, GLONASS y Beidou.

Un resumen histórico

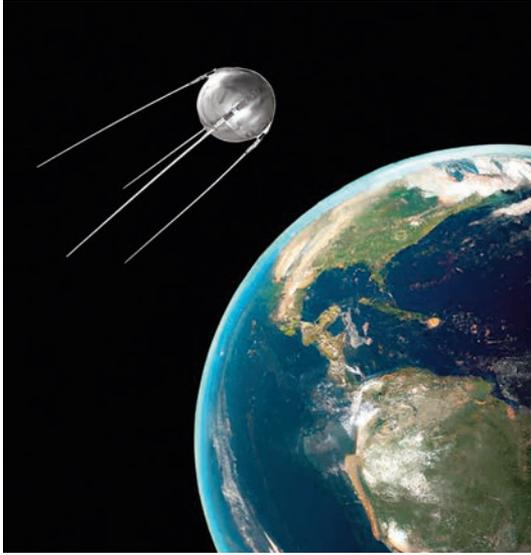


Figura 1. Recreación del satélite *Sputnik-1* en órbita terrestre. Se aprecia su simplicidad, ya que se trataba de una esfera de apenas 60 cm y 83 kg, con cuatro antenas y dos transmisores radio. (Fuente: IA DALL-E)

El inicio de la carrera espacial se remonta a mediados del siglo xx, en plena Guerra Fría, cuando las dos potencias mundiales, Estados Unidos y la Unión Soviética, ponen de manifiesto sus intenciones de lanzar objetos al espacio en órbita terrestre. El 4 de octubre de 1957 se consigue el lanzamiento del primer satélite artificial en órbita, el *Sputnik-1* (2), por parte de la Unión Soviética, confirmandose su capacidad de realizar este tipo de operaciones.

El 31 de enero de 1958, Estados Unidos pone su primer satélite en órbita, el *Explorer-1* (3), que contaba con diversos instrumentos científicos a bordo, como detectores de temperaturas o detector de rayos cósmicos. La investigación en

torno a la carrera espacial fue en auge de forma exponencial, sobre todo por la importancia estratégica de poder controlar esta área de operaciones. De esta forma, se fueron lanzando diversos satélites con múltiples cometidos que ayudaron al desarrollo de diferentes ramas científicas, como la ingeniería de materiales, la propulsión de cohetes, la aeronáutica, sensores y comunicaciones y un largo etcétera. El primer satélite perteneciente a la constelación del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) (4) fue lanzado el 22 de febrero de 1978. A partir de este primer test de validación de funcionamiento, se continuó

(2) *Sputnik* en ruso significa satélite. Fue el primero de los cuatro de similares características del programa Sputnik. El *Sputnik-2* fue bastante famoso por transportar a la perra Laika.

(3) El *Explorer 1* fue el primero de los más de 90 satélites puestos en órbita dentro del programa Explorer de los Estados Unidos y el primero en realizar mediciones de los cinturones de radiación de Van Allen.

(4) *Global Positioning System*. Originalmente conocido como Navstar GPS, es un sistema de navegación desarrollado íntegramente por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Actualmente depende de su Fuerza Espacial.

con la mejora de éstos mediante diferentes bloques, a los que se les incluyeron nuevas señales y capacidades.

Debido a los intereses comerciales y estratégicos y a la participación de más Estados en proyectos espaciales, el lanzamiento de objetos en órbita terrestre se ha incrementado significativamente, cumpliendo multitud de cometidos en ramas como las comunicaciones, la observación de la Tierra, el estudio del sistema solar...

¿Qué son? ¿Dónde se encuentran?

Un satélite artificial puede definirse como un objeto creado por el hombre y que ha sido puesto en el espacio para que orbite alrededor de un planeta u otro cuerpo celeste, como por ejemplo la Luna. Hoy en día, los satélites artificiales son plataformas muy utilizadas, con una gran cantidad de sensores a bordo especializados en diferentes tipos de propósitos.

Podemos destacar tres zonas principales (Seeber, 2003): órbita baja, cercana a la Tierra hasta los 2.000 km; órbita media, entre los 2.000 y 35.700 km aproximadamente, y órbitas altas a partir de ésta. Además, hay algunas especiales, como las Polares en LEO, que pasan por los polos, o las geoestacionarias, a 35.786 km, que mantienen siempre la misma posición con respecto a un punto en la Tierra, ya que su período coincide con el de rotación de ésta (5).

Hay que mencionar también las misiones realizadas fuera de la Tierra llevadas a cabo por distintos tipos de satélites y sondas para explorar diferentes cuerpos celestes dentro de nuestro sistema solar. Estas sondas espaciales han proporcionado valiosos datos y han ampliado nuestro conocimiento sobre el universo al orbitar otros planetas del sistema solar y sus lunas, como es el caso de Júpiter y Saturno.

¿Cuáles son sus principales aplicaciones actuales?

Comunicaciones

Los satélites de comunicaciones se utilizan principalmente para la transmisión de señales, y dependiendo de su ubicación y tipo es posible emplearlos en diferentes cometidos. Por ejemplo, los satélites de comunicaciones en órbitas

(5) Acrónimos más empleados en el segmento espacial: órbita baja (*Low Earth Orbit*, LEO), órbita media (*Medium Earth Orbit*, MEO), órbita alta (*High Earth Orbit*, HEO) y geoestacionaria (*Geosynchronous Equatorial Orbit*, GEO).

climatológico (deshielo, cambios del nivel del mar...), la gestión de recursos naturales, la planificación urbana, la agricultura, la respuesta a desastres naturales... (Anderson, 2017).

Un buen ejemplo es el programa Sentinel (6), que consta de varias misiones diseñadas para recopilar datos en diferentes bandas espectrales. Estos satélites incorporan sensores de todo tipo, con multitud de aplicaciones, como radares de apertura sintética para monitorización del hielo marino, instrumentos ópticos multiespectrales para captura de imágenes en alta resolución, altímetros para cambios en la altura del nivel del mar o espectrómetros de alta resolución para control de la composición atmosférica, entre otros.

Sistemas de navegación por satélite

Estos satélites forman parte de constelaciones cuyo principal cometido es, gracias a las señales emitidas, determinar la ubicación y proporcionar información de navegación precisa en tiempo real. Los más conocidos y utilizados globalmente son: el Navstar GPS, desarrollado y mantenido por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, con cobertura global; la constelación GLONASS, de origen ruso, también con cobertura en todo el globo; el sistema Galileo, desarrollado por la Unión Europea, diseñado para ofrecer una alternativa independiente al GPS y al GLONASS, proporcionando servicios de posicionamiento, navegación y tiempo en todo el mundo, y el Beidou, de China, que ha evolucionado y mejorado con el tiempo y ofrece cobertura en la región de Asia-Pacífico a nivel global.

Estas constelaciones permiten, además del posicionamiento tradicional, una amplia gama de aplicaciones científicas, militares y de seguridad, así como la gestión de emergencias y desastres naturales. Otra importante aplicación en GNSS es la sincronización y distribución precisa de tiempo, ya que los satélites disponen de relojes propios a bordo que les permiten llegar a trabajar en el rango de nanosegundos, lo cual resulta muy útil en diferentes aplicaciones.

Extraterrestre

Este apartado tan llamativo está principalmente compuesto por los satélites con fines astronómicos o de estudio planetario. Destaca en este campo el

(6) El programa *Sentinel* forma parte del Programa Copérnico de la ESA para observación de la Tierra. Actualmente existen cinco misiones, cada una formada por dos satélites, para que puedan ser satisfechas las necesidades de cobertura requeridas.

conocido telescopio espacial James Webb, que permite, gracias a su capacidad de adquisición de imágenes de gran calidad y que elimina las turbulencias atmosféricas, una mejor comprensión de universo. Este tipo de telescopios espaciales ha dado pie a grandes hallazgos, como la existencia de exoplanetas o la edad del universo. Fuera de la Tierra son enviadas sondas, como la *Voyager*, con misiones en el espacio exterior y otras que viajan hasta Marte, Júpiter o Saturno, que nos permiten acercarnos a ellos y conocer con mayor detalle su composición y características, además de realizar otras misiones, como SOHO (7) de observación del Sol (Domingo, 1995).

La ciencia espacial en el ROA

Actualmente en las secciones de Astronomía y Geofísica del ROA se llevan a cabo diferentes labores relacionadas con la investigación espacial. Para poder trabajar en este campo, el ROA cuenta con diversos sensores que se reparten por toda la península y el norte de África, los cuales son operados y mantenidos por el personal de ambos departamentos de forma continua.

La telemetría láser

En la cúpula del edificio principal del ROA se encuentra la Estación de Telemetría Láser, la cual tiene como cometidos principales el seguimiento de satélites artificiales y de basura espacial. Tanto el equipamiento como el *software* de la estación son sometidos a constantes actualizaciones para mantener un alto grado de operatividad. Actualmente, cuenta con dos láseres de 10 Hz de frecuencia de disparo de diferente potencia, con los que es posible llegar a precisiones centimétricas en seguimiento de objetos colaborativos (con espejos retrorreflectores) y retorno de ecos en objetos no colaborativos de tamaño superior a 4,6 m² (Catalán, 2021).

La principal aplicación de esta técnica láser es la de medición de distancias, que permite determinar de forma precisa la órbita de los objetos en seguimiento. Además, los productos científicos derivados de estas observaciones posibilitan calcular posiciones geocéntricas precisas, determinar el movimiento de estaciones en tierra a partir de series temporales, componentes del campo gravitatorio de la Tierra o parámetros de orientación terrestre.

Siguiendo la mentalidad de mantener el equipamiento de la estación a la vanguardia del estado del arte, ésta se encuentra inmersa en el proyecto AMELAS (Sánchez, 2022) para la modernización de la montura que acoge los

(7) *Solar and Heliospheric Observatory*.

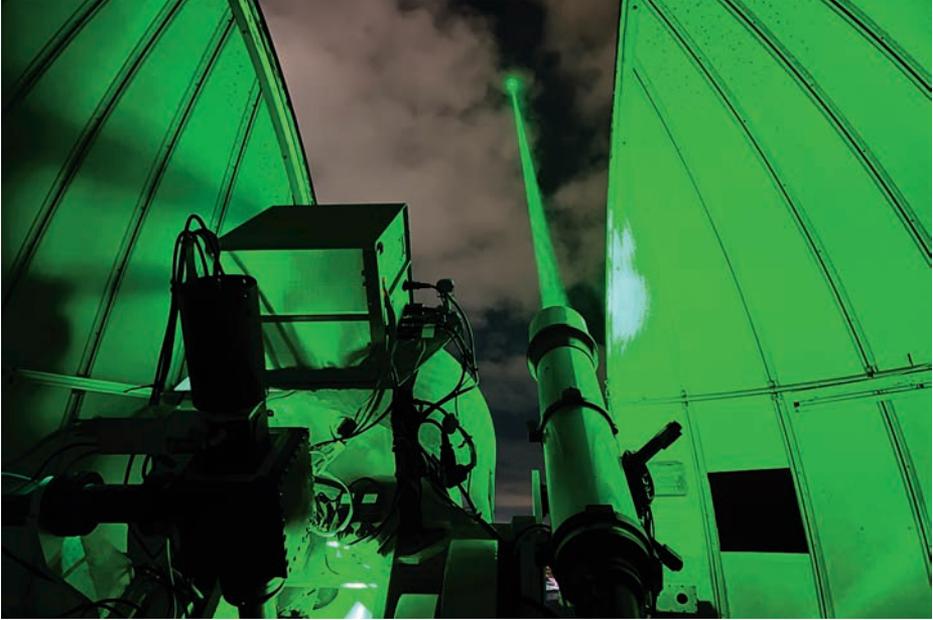


Figura 3. Estación de telemetría láser del ROA en seguimiento durante el crepúsculo vespertino. (Fuente: Ángel Molina, *El diario del Astrónomo*)

telescopios de seguimiento, recepción y transmisión (8). Esta mejora permitirá alcanzar precisiones del orden de pocos arcosegundos y proporcionará una alta velocidad de movimiento, con lo que se podrán realizar seguimientos en órbitas muy bajas y primera etapa de reentrada de objetos en la atmósfera terrestre.

Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)

El ROA cuenta con receptores geodésicos de alta precisión repartidos por todo el sur de la península ibérica y el norte de África, destacando lugares de gran interés científico, como son los peñones de Vélez y Alhucemas y las islas Chafarinas, por ser zonas de confluencia de placas muy activas.

(8) AMELAS (Actualización del conjunto Montura-Electrónica de la estación de telemetría Láser, ROA), proyecto formalizado en octubre de 2022 y adjudicado a la empresa AVS (Added Value Industrial Engineering Solutions), con fecha prevista de finalización a mediados de 2024.



Figura 4. Red de estaciones geodésicas GNSS responsabilidad del ROA. (Fuente: ROA)

De forma resumida y utilizando el conocido como método clásico, se calcula la distancia entre el satélite y el receptor en tierra en una época determinada, más conocida como pseudodistancia. Los satélites emiten de forma continua una señal en la banda L de frecuencias (9), la cual es comparada con la esperada en el propio receptor, que debe estar sincronizada en tiempo (para esto tanto el satélite como el receptor están equipados con relojes atómicos de precisión). Para obtener resultados con mayor precisión, se utiliza el método de determinación de ambigüedades en fase, con el que se compara el número entero de longitudes de onda desplazadas. Normalmente, en geodesia, utilizando estos métodos y con un buen procesamiento de los datos recogidos por los receptores, es posible obtener precisiones del orden del milímetro. Al conseguir el fichero de observación con los datos emitidos por las constelaciones

(9) La banda L de frecuencia ocupada por los sistemas GNSS abarca frecuencias entre 1.164 y 1.610 MHz. Dentro de este espectro, encontramos la banda L para GPS, G para GLONASS, E para Galileo y B para Beidou.

de satélites, se puede realizar un procesado *a posteriori* con múltiples propósitos. Cuando con este tipo de estudios lo que se mide es la posición con una alta precisión, estamos hablando de geodinámica, lo que nos permite efectuar estudios sobre el movimiento de placas tectónicas o deformaciones en la corteza terrestre. Es posible también trabajar en tiempo real, por lo que obtendríamos un posicionamiento cinemático de la estación (consideramos que está en movimiento), lo que nos permitiría, si se trabaja por ejemplo a alta frecuencia, poder detectar terremotos o cambios bruscos en la señal (Seeber, 2003). Por otro lado, también se pueden localizar fenómenos atmosféricos adversos, como la DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos), que se relacionan con el contenido de vapor de agua precipitable (Zhao, 2020), o las tormentas solares, que producen retardos en la señal en las diferentes capas atmosféricas a variar el contenido electrónico de las mismas.

Astronomía

La sección de Astronomía del ROA está dotada con el Telescopio Fabra-ROA Montsec (TFRM), ubicado en el Observatorio Astronómico del Montsec, en el prepirineo leridano, en la franja sur de los Pirineos. Se trata de un proyecto conjunto entre el Observatorio Fabra y el ROA, que cuenta con una cámara Baker-Nunn (diseñada por James Baker) de altas prestaciones ópticas, la cual fue empleada en sus inicios por la NASA (10) para el seguimiento fotográfico de satélites artificiales.

Actualmente se centra en realizar principalmente los siguientes trabajos: exploración sistemática de todo el cielo visible de la región suroeste de Europa, ya que posee una gran apertura óptica, identificación y seguimiento de objetos en órbitas cercanas a la Tierra (es un sensor que se complementa bastante bien con la estación de telemetría láser para el seguimiento de basura espacial y satélites artificiales); detección de planetas extrasolares, y otros estudios astronómicos (Canals, 2018).

¿Qué depara el futuro próximo en la investigación espacial?

Es difícil saber cuál será el camino que seguirá el programa espacial, ya que se trata de un campo amplio y en constante cambio, que avanza a pasos agigantados. Pero es cierto que, fuera de las exploraciones planetarias y del espacio exterior, podemos afirmar que las nuevas tecnologías buscan comunicaciones más avanzadas, cambios en la propulsión y el diseño de satélites y

(10) National Aeronautics and Space Administration.

objetos en órbita, novedades en los métodos de observación de la Tierra debidos al cambio climático y la idea de sostenibilidad y, cómo no, la automatización y la robótica.

Nuevas constelaciones satélite

En cuanto al desarrollo de la tecnología y la investigación satelital, los servicios del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), incluido el europeo Galileo, son en la actualidad y seguirán siendo la columna vertebral en el sector. Aunque es cierto que están surgiendo nuevas ramas complementarias, no llegarán a sustituir estos servicios, pero proporcionarán una serie de desarrollos tecnológicos y científicos importantes. Este tipo de proyectos se basan en la puesta en órbita baja de una amplia red de satélites, los cuales podrán realmente dar cobertura global, incluso en zonas rurales aisladas, con un bajo coste.

Sin duda destaca el programa Starlink desarrollado por la empresa SpaceX (11), fundada por el multimillonario Elon Musk, que mejorará la calidad y velocidad de internet, ya que al poner miles de satélites tan cercanos a la superficie terrestre se reducen los retardos o latencias en las comunicaciones. Además, incluirá nuevas tecnologías que trabajan en frecuencias radio y láser con capacidad de comunicación con estaciones en tierra y entre satélites, mejorando enormemente la eficiencia de estos sistemas.

Un proyecto también destacable en este campo que se está llevando a cabo íntegramente por países europeos y en Europa, es el programa FutureNAV de la Agencia Espacial Europea (ESA). Se trata de implementar una capa complementaria de Posicionamiento, Navegación y Tiempo (PNT) desde la órbita baja de la Tierra (LEO) (Prol, 2022), que tendría la capacidad de proporcionar ventajas complementarias para satisfacer las nuevas demandas de los usuarios y las aplicaciones más exigentes. El objetivo principal de esta iniciativa consiste en poder asegurar la independencia europea en cuanto a infraestructura y servicios de los medios de navegación por satélite, de forma que esta tecnología pueda potenciar el apoyo a misiones científicas y comerciales. El FutureNAV se divide a su vez en dos proyectos: LEO-PNT y GENESIS. En el primero, se busca cumplimentar una serie de capacidades básicas, como son: funcionamiento en medios hostiles (interiores, altas latitudes, entornos urbanos), bajo consumo, protección ante perturbaciones o guerra electrónica y cobertura global. En cuanto al sector comercial, con LEO-PNT se propone dar soporte de navegación a vehículos terrestres (medios de transporte

(11) SpaceX (Space Exploration Technologies Corporation) es una empresa estadounidense dedicada al diseño y fabricación de servicios de transporte espacial.



Figura 5. Simulación futura constelación satélites Starlink de SpaceX.
(Fuente: *National Geographic*. España)

personal y público), al sector aeronáutico (drones, aviones...), al marítimo, al usuario a nivel personal (teléfonos móviles) y, por supuesto, mejorar las prestaciones de transferencia de tiempo; esto conlleva que sea necesario abarcar un amplio abanico de frecuencias de funcionamiento, desde UHF a banda K. Por otro lado, GENESIS es un subproyecto centrado en la rama científica, especialmente en la geodesia por satélite, con lo que se busca integrar en una misma plataforma en órbita cuatro tecnologías geodésicas o de medición de la Tierra diferentes: GNSS, radio navegación, SLR (12) (telemetría láser) y VLBI (13) (interferometría de muy larga base). Esto supondría disponer de un observatorio espacial dinámico que, al combinar todas estas técnicas juntas, encontraría ventajas como la datación en tiempo en las mediciones.

(12) *Satellite Laser Ranging*.

(13) *Very Long Baseline Interferometry*.

Mantenimiento del medio terrestre y espacial

Otro punto importante en el futuro próximo es el estudio del cambio climático y la sostenibilidad de los medios tanto terrestres como espaciales. En este campo, cobra especial interés la observación y monitorización de los cambios en nuestro planeta gracias, de nuevo, al uso de diferentes satélites artificiales. Se espera conseguir poner en órbita sensores más sofisticados que permitan obtener datos de mayor calidad y recolectados desde diferentes fuentes, lo que permitiría comprender mejor estos procesos terrestres y a su vez hacer una gestión más eficiente de los recursos disponibles en la Tierra. De esta forma podremos estudiar fenómenos como la deforestación, las sequías, los cambios en el nivel del mar, el deshielo... y por lo tanto disponer de ciertos datos que, en manos expertas, proporcionen al mundo científico posibles acciones para contrarrestar este tipo de cambios. Se dispondrá de diferentes tipos de sensores con diferentes tecnologías, como por ejemplo radar, óptica, de espectrometría o láser.

No hay que olvidar el desafío real que supone la basura espacial, ya que se está saturando la órbita terrestre con residuos que pueden ser peligrosos para futuras misiones espaciales. Para ello se están explorando y desarrollando métodos de recogida o eliminación de estos objetos espaciales, pero también técnicas que permitan que los elementos lanzados al espacio retornen a la tierra cuando acaben su misión.

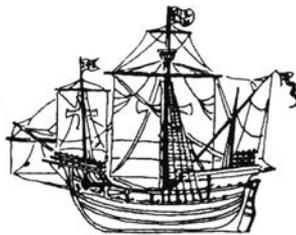
Las comunicaciones

Hay todo un desafío en cuanto al desarrollo de las comunicaciones, ya que cada vez es más necesario mantener una conexión lo más parecida al tiempo real entre los diferentes equipos e infraestructuras. En el segmento espacial, está en auge la investigación de las comunicaciones ópticas mediante tecnología láser (Majumdar, 2010), que podríamos asemejar con una fibra óptica cuyo medio es el aire o, en el caso del espacio, el vacío. Este tipo de tecnología ofrece ciertas ventajas con respecto a las convencionales basadas en radiofrecuencia. El láser presenta una frecuencia de trabajo más alta, lo que permite una mayor capacidad de transferencia de datos. Al viajar a la velocidad de la luz, los retardos que se producen en las comunicaciones son insignificantes, aunque evidentemente depende de la distancia a la que propaguemos la señal. Otro punto a favor es que este tipo de comunicaciones, al ser muy direccionales, son difíciles de perturbar, y por tanto son más seguras. Además, como en cualquier segmento espacial se busca disminuir el consumo al máximo, el láser es una herramienta más eficiente energéticamente que las comunicaciones tradicionales, lo que lo convierte en otro firme candidato a las mismas. Por otro lado, no todo son ventajas, y nos encontramos con dos principales

inconvenientes en la transmisión láser: la necesidad de direccionalidad —que supone visión en línea recta y un correcto apuntado de los dispositivos emisor y receptor— y la propagación en medios diferentes al vacío, como sucede con la atmósfera, ya que ésta puede absorber parte de la energía del láser y además sufrir dispersiones que desvían la trayectoria del mismo. A pesar de esto, se espera que la tecnología láser llegue a ser indispensable en el mundo de las comunicaciones espaciales y ya se han conseguido enlaces entre satélites o con otro tipo de misiones a la velocidad de la luz; pero son proyectos iniciales que necesitan desarrollo. Esto podría incrementar significativamente la información recibida desde cualquier parte del sistema solar, lo que permitiría, por ejemplo, tener un enlace rápido con sondas planetarias o misiones extraterrestres de próxima generación.

Conclusión

El intrigante y emocionante futuro de la ciencia y el desarrollo de las tecnologías espaciales abarcan multitud de disciplinas. La exploración de otros planetas, la observación de los cambios en la Tierra, la astronomía, la búsqueda de nuevas comunicaciones más rápidas y seguras y un sinnúmero de temas relacionados con la sostenibilidad de nuestro planeta avanzan paso a paso y aumentan nuestro conocimiento de nuevas tecnologías y del universo. De lo que no cabe duda es de que la presencia del ser humano en el espacio irá incrementándose, ya que las tecnologías innovadoras, como las comunicaciones con medios láser, aumentan sus capacidades al ser puestas en práctica fuera de la atmósfera de nuestro planeta en un medio como el vacío.



BIBLIOGRAFÍA

- SEEBER, G. (2003): *Satellite Geodesy*. Edit. Walter de Gruyter, Berlín-Nueva York, 2.^a edición, ISBN: 3-11-017549-5.
- PELTON, J. N.; MADRY, S.; CAMACHO-LARA, S. (2012): *Handbook of satellite applications*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- ANDERSON, K.; RYAN, B.; SONNTAG, W.; KAVVADA, A.; FRIEDL, L. (2017): «Earth observation in service of the 2030 Agenda for Sustainable Development». *Geo-spatial Information Science*, 20(2), pp. 77-96.
- DOMINGO, V.; FLECK, B.; POLAND, A. I. (1995): «The SOHO mission: an overview». *Solar Physics*, 162, pp. 1-37.
- CATALÁN MOROLLÓN, M.; SÁNCHEZ-PIEDRA, M.; LARRÁN, M.; VERA, A.; DELLA PRUGNA, F.; MARIN, J.; RELINQUE, J. (septiembre 2021): «The ROA Laser Station: From Artificial Satellites to Space Debris Tracking». *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica* (Serie de Conferencias), vol. 53, pp. 161-165.
- SÁNCHEZ-PIEDRA, M.; CATALÁN MOROLLÓN, M.; VERA, A.; MARÍN, J.; LARRÁN, M.; RELINQUE, J.; RODRÍGUEZ, D. (2022): «La estación láser del Real Instituto y Observatorio de la Armada». IX Congreso Nacional de I + D en Defensa y Seguridad, DESEi+d. Pontevedra.
- ZHAO, Q., *et al.* (2020): «A Drought Monitoring Method Based on Precipitable Water Vapor and Precipitation». *Journal of Climate*, 33, pp. 10.727-10.741.
- CANALS ROS, L.; NÚÑEZ DE MURGA, J.; LÓPEZ MORCILLO, R.; DEL SER BADIA, D.; MERINO ESPASA, M. T. (2018): «Proyecto de mejora del telescopio TFRM en el marco de apoyo SST de la UE». Actas del VI Congreso Nacional de I + D en Defensa y Seguridad (DESEi+d).
- PROL, F. S.; FERRE, R. M.; SALEEM, Z.; VÁLISUO, P.; PINELL, C.; LOHAN, E. S.; KUUSNIEMI, H. (2022): «Position, Navigation, and Timing (PNT) through low earth orbit (LEO) satellites: A survey on current status, challenges, and opportunities». *IEEE Access*.
- MAJUMDAR, A. K.; RICKLIN, J. C. (eds.) (2010): «Free-space laser communications: principles and advances» (vol. 2). *Springer Science+Business Media*.