

60 AÑOS DE LA DISCIPLINA SLR: ORIGEN, EVOLUCIÓN Y SU IMPACTO EN LA OBSERVACIÓN DE LA TIERRA Y EL ESPACIO

Introducción

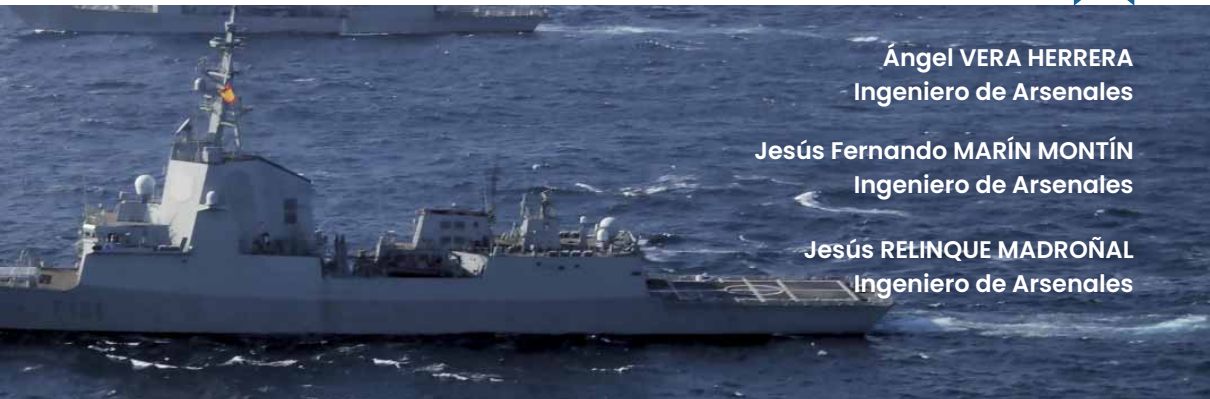
EN los últimos sesenta años, el seguimiento de objetos artificiales en la órbita terrestre ha experimentado un continuo desarrollo y perfeccionamiento. Una de las técnicas más relevantes en este ámbito es la Telemetría Láser a Satélites y Basura Es-

pacial, conocida como *Satellite Laser Ranging* (SLR) y *Space Debris Laser Ranging* (SDLR)¹. Estas técnicas permiten medir con alta precisión la distancia entre una estación terrestre y un objeto en órbita, siendo fundamentales para la determinación precisa de órbitas, así como para profundizar en el conocimiento de la propia Tierra.

Figura 1. Realización de un seguimiento en la estación SLR SFEL, perteneciente al Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) en San Fernando y ubicada en la cúpula del edificio principal del complejo. (Fuente: Franco Della Prugna y Ángel Vera Herrera)



1. El término SDLR es de reciente uso. Es habitual que en la literatura se utilice SLR para referirse a ambas técnicas al ser similares. En este artículo se usará este último para englobar ambas disciplinas.



Ángel VERA HERRERA
Ingeniero de Arsenales

Jesús Fernando MARÍN MONTÍN
Ingeniero de Arsenales

Jesús RELINQUE MADROÑAL
Ingeniero de Arsenales

Desde sus primeros pasos en la década de 1960, la técnica SLR ha evolucionado desde configuraciones manuales con bajas tasas de repetición y medidas puntuales hasta sistemas actuales automatizados capaces de realizar miles de mediciones por segundo. Este progreso ha permitido aumentar la precisión, fiabilidad y cobertura de las estaciones, consolidando su importancia dentro de las redes internacionales de observación y seguimiento espacial.

El uso de la técnica es clave en aplicaciones científicas como la geodesia, la determinación precisa de la forma y movimientos de la Tierra, la validación de órbitas y la mejora de los marcos de referencia terrestres (Lemoine, 2020). Además, contribuye activamente a la vigilancia del espacio, permitiendo el seguimiento de fragmentos de basura espacial o satélites inoperativos, mejorando la seguridad de las operaciones en órbita y futuras misiones espaciales (Steindorfer *et al.*, 2025). En este ar-

tículo, el lector encontrará una visión amena sobre el funcionamiento, origen y evolución de la técnica SLR. Se tratarán sus aplicaciones científicas, civiles y estratégicas, así como los desafíos que definirán su futuro. Finalmente, se presentará la estación SFEL (figura 1), perteneciente al Real Instituto y Observatorio de la Armada², como ejemplo de la contribución de las Fuerzas Armadas a esta disciplina mediante la participación en redes internacionales como el ILRS y EUROLAS³, o de vigilancia espacial como S3T⁴.

La técnica *Satellite Laser Ranging*

Una de las disciplinas más precisas desarrolladas para el seguimiento de objetos artificiales en órbita es la técnica *Satellite Laser Ranging* (SLR), una de las cuatro de geodesia espacial, junto con VLBI, GNSS y DORIS⁵. Esta tecnología permite determinar con precisión⁶

2. . Conocido por ROA.

3. ILRS (*International Laser Ranging Service*), organismo internacional encargado de coordinar las actividades relacionadas con la técnica SLR, así como de generar productos científicos para aplicaciones geodésicas, astronómicas y espaciales. EUROLAS (*European Laser Network*), red regional europea dentro del ILRS.

4. S3T (*Spanish Space Surveillance and Tracking*).

5. VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), GNSS (*Global Navigation Satellite System*) y DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*).

6. Parte de la precisión depende del ancho temporal del pulso láser. En el rango de picosegundos, alcanza el orden de milímetros; en el rango de nanosegundos, la precisión se reduce a la escala de metros.

la distancia entre una estación SLR terrestre y los objetos mediante la medición del tiempo que tarda un pulso láser en recorrer el trayecto de ida y vuelta. A continuación, ofrecemos al lector una introducción a esta disciplina, tratando los principios básicos de funcionamiento, así como sus aplicaciones.

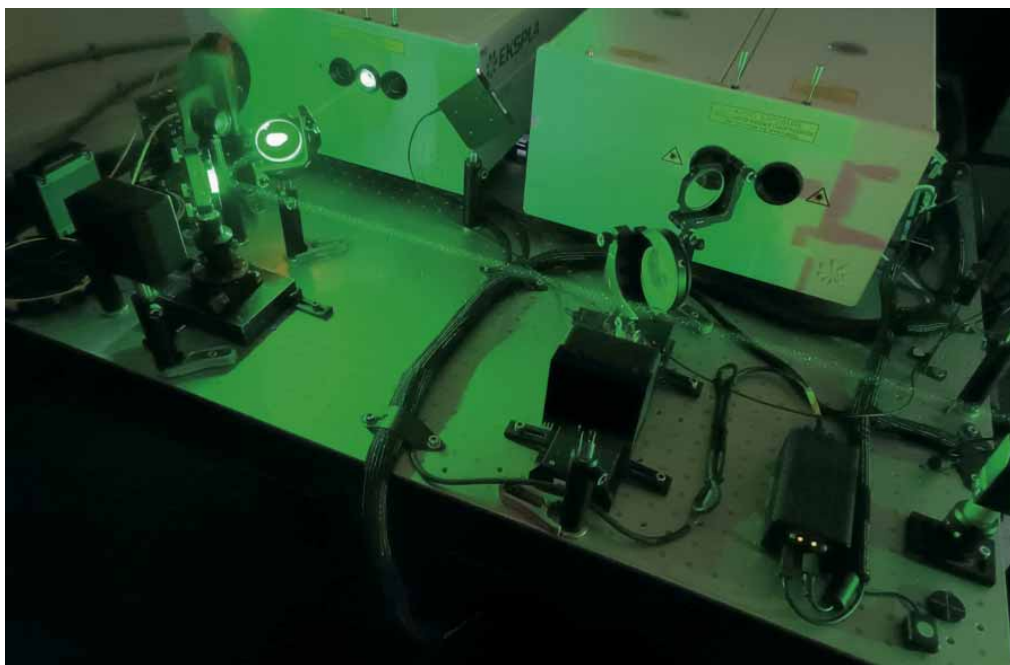
Principios básicos de funcionamiento

El funcionamiento de la técnica, basado en el principio pulso-eco, consiste en emitir pulsos cortos de luz láser (figura 2) desde una esta-

ción SLR terrestre hacia un objeto en órbita (pulso) y captar mediante un detector⁷ la luz láser reflejada (eco). Los instantes de emisión y recepción son registrados a través de equipos datadores de eventos con una precisión cercana al picosegundo, lo que permite calcular el tiempo de viaje entre el pulso y el eco. La mitad de este tiempo, junto con diversas correcciones⁸, se traduce en una medida directa de distancia (Rodríguez & Graham, 2021).

Es interesante destacar que los detectores utilizados sólo pueden activarse unos instantes antes (decenas de nanosegundos) del

Figura 2. Mesa óptica y bancos láser fabricados por EKSPLA, pertenecientes a la estación SFEL, ambos de 10 Hz de repetición y 532 nm de longitud de onda (verde). A la izquierda, el modelo PL2251 para objetos colaborativos. A la derecha, el modelo NL317-SH para basura espacial no colaborativa. (Fuente: Jesús Fernando Marín Montán)



7. Los detectores utilizados suelen ser C-SPAD (*Compensated-Single Photon Avalanche Photodiode*) optimizados para la detección de fotones individuales. También es habitual el uso de tubos fotomultiplicadores (PMT).

8. La medida debe corregirse considerando factores como la refracción atmosférica, la calibración instrumental de la estación, el centro de masas del satélite y otras pequeñas correcciones.

momento estimado de la llegada del eco. De no ser así, la luz ambiente saturaría el sensor. Esto requiere el uso de sistemas de tiempo real⁹, denominados *range gate generators*, capaces de coordinar con exactitud la emisión de pulsos y la habilitación del sensor (Yang *et al.*, 2021).

Las observaciones de distancia registradas por las estaciones se almacenan inicialmente como datos filtrados (*full rate data*), que recogen todas las mediciones realizadas a un objeto durante una pasada¹⁰. A partir de estos datos, se generan los puntos normales (*normal points data*), una reducción estadística obtenida mediante la condensación de los datos filtrados en intervalos temporales cortos y estandarizados (ILRS, 2018). Desde finales de los años 80, los puntos normales se han convertido en el producto directo principal de las estaciones SLR, ya que permiten reducir el volumen de datos y minimizar el ruido instrumental.

Objetos en la órbita terrestre

Los distintos objetos que orbitan la Tierra, comúnmente denominados objetos espaciales (*space objects*), pueden clasificarse en tres grandes categorías principales: los satélites



Figura 3. Imagen del satélite geodésico LAGEOS-1. Se puede observar su superficie esférica de 60 cm de diámetro recubierta de retrorreflectores. (Fuente: NASA)

artificiales pasivos, los activos y la basura espacial (Kerrest, 2001). A su vez, éstos pueden ser colaborativos o no colaborativos, dependiendo de la presencia o no de espejos retrorreflectores (LRR)¹¹.

Los satélites artificiales pasivos, también denominados geodésicos, están diseñados para minimizar los efectos del rozamiento atmosférico y resaltar las influencias gravitacionales puras. Suelen ser pequeñas esferas densas recubiertas de conjuntos de retrorreflectores (figura 3). Gracias a su diseño y a la estabilidad de sus órbitas, resultan ideales para

9. Es habitual que estos sistemas estén implementados mediante FPGA (*Field Programmable Gate Arrays*), dispositivos programables altamente versátiles que permiten configurar arquitecturas de control adaptadas a las necesidades de cada estación SLR.

10. El término hace referencia a la trayectoria que sigue un objeto en órbita, dada una localización y tiempo en la Tierra, desde que se hace visible al sobrepasar el horizonte hasta que vuelve a desaparecer tras él.

11. LRR (*Laser Retro-Reflector*), espejos diseñados para reflejar la luz siempre en dirección al emisor, independientemente del ángulo de incidencia.

estudios geodésicos y geodinámicos de alta precisión mediante SLR.

Los satélites artificiales activos son aquéllos que incluyen instrumentación para misiones específicas, como satélites oceanográficos, altimétricos o meteorológicos, o funciones técnicas concretas, como los satélites de navegación. Suelen incorporar retrorreflectores para facilitar el retorno de ecos. Debido a la precisión requerida en sus productos científicos y operacionales, es fundamental la determinación precisa de sus órbitas.

La basura espacial hace referencia a cualquier objeto artificial en órbita que ha perdido su funcionalidad. Incluye desde etapas de cohetes, satélites obsoletos y restos de colisiones hasta fragmentos pequeños como tornillos. Su elevada velocidad orbital los convierte en un riesgo significativo para operaciones espaciales, especialmente teniendo en cuenta la continua proliferación de estos objetos (ESA, 2024). Dependiendo del caso, éstos pueden llevar o no retrorreflectores.

Aplicaciones científicas, estratégicas y de seguridad

En el ámbito científico, la técnica SLR proporciona datos esenciales para la definición y mejora del ITRF¹², la monitorización de la rotación de la Tierra, el seguimiento de las deformaciones de la superficie terrestre y la determinación precisa de las coordenadas de las estaciones de seguimiento. También permite estimar con precisión las variaciones

temporales del centro de masas terrestre, coeficientes estáticos y variables del campo gravitatorio y órbitas satelitales. Además, la técnica contribuye en otra gran variedad de aplicaciones científicas y operacionales, como la monitorización del nivel del mar, la dinámica oceánica o la evolución de las capas de hielo (ILRS, 2013).

Todos los años surgen nuevos estudios que refuerzan la importancia de la técnica a nivel científico. Por ejemplo, se ha demostrado cómo las observaciones a satélites GNSS¹³ permiten estimar con alta precisión parámetros geodésicos globales como la rotación terrestre, el movimiento del geocentro y la escala terrestre (Li *et al.*, 2024). Asimismo la técnica ha demostrado ser eficaz en la medición de efectos relativistas, contribuyendo a la validación de la relatividad general y a la física fundamental (Matyszewski, *et al.*, 2023).

Respecto a las aplicaciones estratégicas y de seguridad, destaca la creciente importancia de la técnica SLR en el seguimiento y caracterización de basura espacial. La información obtenida mediante campañas de seguimiento centradas en estos objetos permite mejorar la predicción de las trayectorias orbitales, minimizar el riesgo de colisiones y proteger las infraestructuras espaciales activas. De esta manera, la disciplina contribuye de forma relevante a la gestión y control del entorno espacial cercano a la Tierra, proporcionando datos que apoyan las decisiones operativas relacionadas con la seguridad espacial y la sostenibilidad del espacio, reforzando así la capacidad de los organismos responsables

12. ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), es el marco de referencia global que proporciona posiciones y velocidades precisas de puntos en la superficie terrestre.

13. GNSS (*Global Navigation Satellite System*), sistemas de navegación global por satélite como las constelaciones GPS, Galileo, GLONASS o BeiDou.

de la vigilancia y protección del espacio para mantener un entorno orbital seguro y ordenado (Catalán *et al.*, 2016).

En conjunto, la técnica SLR presenta un impacto decisivo tanto en la ciencia como en la seguridad espacial. Su capacidad para monitorizar con gran precisión la posición de satélites y objetos no cooperativos la convierte en una herramienta imprescindible para el avance de la ciencia, así como para la sostenibilidad del entorno orbital y la protección de activos espaciales.

Orígenes y evolución histórica de la disciplina

La técnica SLR ha recorrido más de seis décadas de desarrollo hasta convertirse en una herramienta fundamental para la geodesia, la dinámica terrestre y la seguridad espacial. A continuación, el lector tendrá la oportunidad de recorrer las principales etapas que marcaron la evolución de esta disciplina.

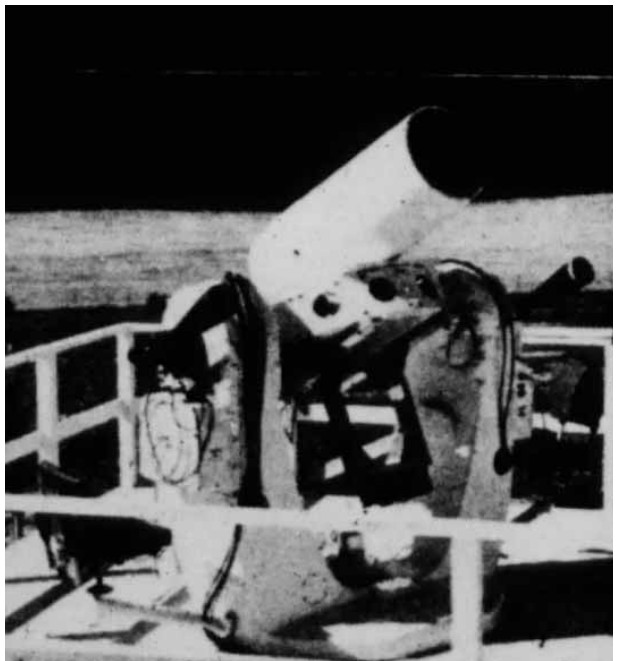
Años 60 y primeras observaciones

El origen de la técnica SLR estuvo fuertemente ligado al desarrollo de la tecnología láser, inventada en 1960. Hasta ese momento, las técnicas de seguimiento basadas en observaciones ópticas y radiofrecuencia presentaban limitaciones importantes en cuanto a la precisión. Por ejemplo, los radares ofrecían una precisión de unos 75

metros, mientras que las primeras mediciones SLR alcanzaron precisiones cercanas a los tres metros, lo que supuso una mejora significativa (NASA, 2014).

La disciplina comenzó en 1964 tras los primeros experimentos exitosos realizados en el Goddard Space Flight Center de la NASA, en Greenbelt, Maryland. El 31 de octubre de ese año, fue medida por primera vez la distancia al satélite Beacon Explorer B¹⁴ mediante un láser de rubí ubicado sobre una montura de seguimiento de misiles Nike-Ajax operada manualmente mediante telescopios ópticos y *joysticks* (figura 4). Este sistema se denominó

Figura 4. Fotografía de 1964 en la que se puede observar el sistema GODLAS, ubicado en el Goddard Space Flight Center. Este sistema realizó el primer seguimiento SLR exitoso. (Fuente: John Degnan)



14. También conocido como Explorer 22 (NORAD 899), fue un satélite destinado a estudiar la ionosfera y el primero equipado con retrorreflectores láser para telemetría SLR.

GODLAS¹⁵. El retorno del pulso láser se observó mediante un tubo fotomultiplicador conectado a un osciloscopio. Este hito marcó el nacimiento de una nueva era en las técnicas de seguimiento orbital (NASA, 2014).

A partir de 1965, con el lanzamiento del satélite Beacon Explorer C¹⁶, la técnica se optimizó y la calidad de los datos mejoró rápidamente. En poco tiempo se lograron realizar cientos de mediciones, que permitieron demostrar el potencial de esta técnica para la determinación precisa de órbitas y, en consecuencia, para la geodesia. En esta etapa, las estaciones operaban con sistemas poco automatizados y láseres de baja frecuencia, cercanos a 1 Hz (NASA, 2014).

A finales de la década de 1960, la técnica se había extendido internacionalmente, con estaciones operativas en Estados Unidos y Europa. Para ampliar la cobertura, se desarrollaron estaciones móviles que podían desplazarse para colaborar en la calibración de otras instalaciones (NASA, 2014).

Es interesante mencionar que la evolución de la técnica también permitió extender las mediciones más allá de la órbita terrestre. Desde 1969, las misiones Apolo¹⁷ instalaron retrorreflectores en la Luna, lo que permitió iniciar las mediciones de Telemetría Láser Lunar (LLR)¹⁸, una evolución directa del concepto original que sigue operativa en la actualidad (Shelus, 2001).

Consolidación y redes internacionales

Un paso decisivo en la consolidación de la disciplina fue el lanzamiento en 1976 del satélite geodinámico LAGEOS-1¹⁹, específicamente diseñado para la telemetría láser. Este satélite proporcionó mediciones de gran calidad y permitió establecer redes internacionales de observación láser con mayor precisión, sentando las bases para la consolidación de la técnica a nivel global.

Durante las décadas siguientes, el progreso continuó con el desarrollo de estaciones más automatizadas, la incorporación de láseres de mayor frecuencia y la mejora de los detectores, lo que permitió incrementar la cantidad y calidad de los datos obtenidos. En las décadas de 1980 y 1990, las estaciones clásicas operaban con frecuencias cercanas a 10 Hz, un gran avance respecto a los primeros sistemas. Precisamente, fueron estos avances los que sentaron las bases para la creación en 1998 del ILRS, el organismo que se encargaría de coordinar y centralizar la actividad global de las estaciones, garantizando su interoperabilidad y calidad (ILRS, 2016).

Alta frecuencia y basura espacial

A partir de la década de 2000, comenzaron a realizarse experimentos con bancos láser de

15. El nombre GODLAS proviene de *Goddard Laser*. El sistema estaba ubicado en el Goddard Optical Research Facility, actualmente conocido como el Goddard Geophysical and Astronomical Observatory.

16. También conocido como Explorer 27 (NORAD 1328). Su principal objetivo era registrar observaciones del contenido de electrones entre la Tierra y el satélite a nivel global.

17. Las misiones Apolo 11 (1969), Apolo 14 (1971) y Apolo 15 (1971) tuvieron como objetivo principal la exploración tripulada de la superficie lunar, incluyendo la instalación de experimentos científicos y la recogida de muestras.

18. LLR (*Lunar Laser Ranging*), ampliación de la técnica SLR para medir las distancias desde estaciones en Tierra a la Luna.

19. LAGEOS (Laser Geodynamics Satellite), satélite geodinámico (NORAD 8820) cuya estructura esférica recubierta de 426 retrorreflectores permite obtener mediciones geodésicas de alta precisión. El cuerpo es de latón y aluminio, tiene 60 cm de diámetro y una masa de 405 kilos.

kHz, lo que permitió aumentar la tasa de adquisición y reducir el ruido estadístico. Por ejemplo, en la década de 2010, estaciones como GRZL (Graz, Austria), MATM (Matera, Italia) y SHA2 (Shanghái, China) comenzaron a operar con sistemas capaces de disparar a kHz, marcando un hito significativo en la evolución de la técnica (Kirchner *et al.*, 2003).

Además de las aplicaciones tradicionales, la telemetría láser comenzó a extenderse al seguimiento de objetos no cooperativos, especialmente fragmentos de basura espacial. Gracias al incremento de la frecuencia de disparo y a láseres de alta energía, las estaciones modernas comenzarán a seguir objetos sin retrorreflectores y realizar determinaciones orbitales con alta precisión (Zhongping, 2017). Ejemplos de estaciones que

demonstraron estas capacidades son la de Graz y Matera, que realizaron con éxito diversas campañas específicas para el seguimiento de estos objetos (Kirchner *et al.*, 2013).

Desde entonces, la técnica SLR se ha consolidado como una disciplina viva y en constante evolución, alcanzando niveles de precisión milimétrica y ampliando sus aplicaciones científicas a ámbitos fundamentales como los ya mencionados.

Además, su evolución ha permitido extender el uso al seguimiento de objetos no colaborativos (como fragmentos de basura espacial), convirtiéndose en una herramienta estratégica para mejorar la seguridad de las operaciones en órbita y apoyar los programas de vigilancia y defensa espacial.

Figura 5. Estación SLR de nueva generación YLARA, perteneciente al Observatorio de Yebes (Guadalajara), durante un seguimiento. (Fuente: RAEGE)



Retos y futuro de la disciplina

La técnica SLR sigue en constante evolución para hacer frente a los retos actuales y futuros. Cada vez son más los objetos a seguir, tanto dentro de la red del ILRS como los relacionados con la basura espacial, por lo que se ha vuelto necesario aumentar las capacidades de las estaciones SLR, modernizando las actuales y desarrollando otras nuevas por todo el mundo, como la reciente estación YLARA del Observatorio de Yebes (figura 5), perteneciente al IGN²⁰.

La modernización de las estaciones actuales se está llevando a cabo mediante el uso de componentes cada vez más precisos y adaptados a la técnica, como por ejemplo datadores de eventos con mayor precisión o láseres con características²¹ adaptadas a los nuevos usos. Es especialmente destacable el aumento de la frecuencia de disparo por encima del kilohercio, sólo posible en algunas estaciones. Este aumento cumple un doble objetivo: incrementar la precisión de los resultados obtenidos y disminuir el tiempo necesario para conseguirlos (Wilkinson *et al.*, 2018). Recientemente, se han empezado a conseguir resultados a una frecuencia de disparo de 1 MHz (Wang *et al.*, 2022), incluso sobre objetos de basura espacial (Steindorfer *et al.*, 2025).

Aparte de la telemetría láser tradicional, la técnica SLR está empezando a ser empleada en nuevas aplicaciones. Entre ellas podemos destacar la transferencia de tiempo, que permite sincronizar los relojes de los satélites con

los de la Tierra y la transferencia de datos tanto con satélites en órbita como hacia objetos en el espacio (Wilkinson *et al.*, 2018).

Además de las aplicaciones anteriores, la disciplina está explorando nuevas fronteras, como la transferencia de momento²² a objetos en órbita, especialmente basura espacial. Un estudio de 2022 presenta un concepto de transferencia de impulso cinético desde una estación en tierra mediante pulsos láser dirigidos a desechos orbitales en órbitas bajas, con el fin de alterar mínimamente su trayectoria y reducir riesgos de colisión (Cordelli *et al.*, 2022). Esta técnica podría complementar futuras estrategias de mitigación sin necesidad de actuadores físicos en el espacio.

La estación SLR del ROA

En este apartado, damos a conocer al lector la estación láser SFEL, perteneciente al ROA, sus orígenes y la evolución que ha experimentado a lo largo de su historia, marcada por sucesivas renovaciones y mejoras en sus capacidades.

El ROA y su papel en SLR

El Real Instituto y Observatorio de la Armada, fundado por Jorge Juan en 1753 en la ciudad de Cádiz y posteriormente trasladado a la Isla de León (actual San Fernando) en 1798, es una institución científica históricamente vinculada a la Armada. Desde sus inicios, el Observatorio se dedicó a la astronomía de posición, la

20. IGN (Instituto Geográfico Nacional).

21. Entre las nuevas características, destacan el uso de láseres energéticos con diferentes longitudes de onda (infrarrojo, verde), frecuencias de disparo elevadas y sistemas de control versátiles.

22. La transferencia de momento hace referencia a la cantidad de movimiento que una partícula transmite a otra al colisionar.

medición del tiempo y la determinación de coordenadas geográficas, contribuyendo al desarrollo de la geodesia en España.

Aunque actualmente existen más estaciones SLR en España, como YLARA e IZIL²³, la perteneciente al ROA es la pionera en la técnica en nuestro país. Su entrada oficial en el ámbito SLR llegó en la década de 1980, cuando comenzó a consolidarse a nivel internacional (Catalán *et al.*, 2019), momento en el que la estación del ROA se integró en el ILRS con el nombre de SFEL, convirtiéndose en un activo importante para España en el campo de la geodesia espacial, proporcionando datos esenciales de seguimiento de satélites, especialmente en órbitas bajas (LEO)²⁴.

Evolución de la estación SFEL y sus características

Tiene su origen en la cesión de una estación experimental móvil por parte de la institución francesa CNES²⁵ (figura 6). En 1977 se nombra al primer jefe de servicio de la estación, Francisco Gómez Armario, y se contrata para el desarrollo de la estación al ingeniero Manuel Quijano Macías.

Su instalación en su ubicación actual comenzó en 1979, cuando se

trasladó la estación móvil francesa a la cúpula del edificio principal del ROA. Durante sus primeros años de funcionamiento, la estación utilizó el equipamiento original francés, compuesto por un láser de rubí²⁶, un contador con resolución de un nanosegundo y un telescopio receptor de 40 cm de diámetro. Esta configuración permitía una precisión cercana al metro y facilitó la recopilación de datos de numerosos satélites en órbitas inferiores a 3.000 kilómetros.

En 1983, la SFEL mejoró con la cesión, por parte de la estación francesa de Grasse, de un nuevo láser de rubí de mayor potencia²⁷, junto con una renovación de los sistemas electrónicos de control y la adquisición de un Cassegrain de 60 cm, actual telescopio de la estación.

Figura 6. El ingeniero Jean Louis Hatat en el interior de la primitiva estación experimental móvil del CNES, ubicada en los terrenos del ROA en los años 70. (Fuente: ROA)



23. IZIL es el código de la estación SLR de Izaña (Tenerife), desarrollada y gestionada por la ESA.

24. LEO (*Low Earth Orbit*) es aquel conjunto de órbitas que no superan una altura máxima de 2.000 km respecto a la superficie terrestre.

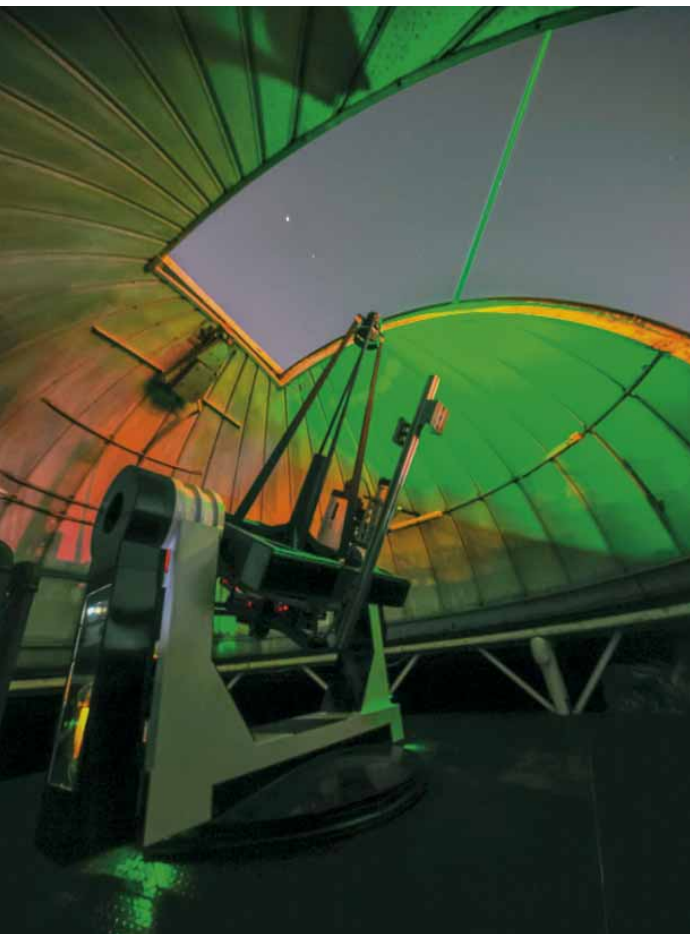
25. CNES (Centre National d'Études Spatiales/Centro Nacional de Estudios Espaciales) es la agencia espacial del gobierno francés, responsable de su política espacial y del desarrollo de programas científicos y tecnológicos en el ámbito aeroespacial.

26. Láser de primera generación, con un julio de energía y 30 nanosegundos de ancho de pulso.

27. Láser de tres julios y 10 nanosegundos de ancho de pulso.

En 1987 se adquirió un nuevo láser Nd:YAG²⁸ y se llevó a cabo una transformación en la operativa de funcionamiento, permitiendo el seguimiento continuo de satélites. La adaptación incluyó la renovación de la óptica de emisión y recepción, puesto que el nuevo láser

tenía una longitud de onda de 532 nm (color verde), mientras que el anterior operaba en la banda del infrarrojo (invisible al ojo humano). Tras superar diversos desafíos técnicos, se alcanzó un funcionamiento estable en la observación de satélites de órbita baja.



En 2017 se adquirieron dos bancos láser Nd:YAG de la empresa EKSPLA, uno para seguimiento de satélites con retrorreflectores²⁹ y otro de alta energía para el seguimiento de basura espacial³⁰. Para poder llevar a cabo la integración de estos nuevos bancos y, a su vez, modernizar la estación, comenzó el desarrollo de un nuevo *range gate generator* y de un nuevo sistema *software* de control y monitorización para la estación, siguiendo los principios del *hardware* y *software* libres. Estos trabajos son llevados a cabo por el personal de la estación y, aunque a día de hoy continúan en desarrollo, están plenamente operativos y han sido presentados en foros internacionales.

En 2024 tuvo lugar la última actualización de gran envergadura

Figura 7. Interior de la cúpula y nueva montura de la estación SFE (proyecto AMELAS) durante un seguimiento.
(Fuente: José Antonio Peña García)

28. Nd:YAG (*neodymium-doped yttrium aluminum garnet*/granate de itrio y aluminio dopado con neodimio) es un tipo de láser de estado sólido que emite típicamente en el infrarrojo cercano (1.064 nm) o, mediante duplicación de frecuencia, en el visible (532 nm). Es ampliamente utilizado por su alta estabilidad, potencia y precisión en aplicaciones científicas e industriales.

29. Modelo PL2251 de EKSPLA, con una longitud de onda de 532 nm, una energía por pulso de 50 mJ, una potencia media de 0,5 W y una frecuencia de repetición de 10 Hz.

30. Modelo NL317 de EKSPLA, con una longitud de onda de 532 nm, una energía por pulso de 2500 mJ, una potencia media de 25 W y una frecuencia de repetición de 10 Hz.



Figura 8. Nuevo puesto de control de la estación SFEL durante un seguimiento. Se puede observar parte del *software* de control desarrollado por los ingenieros de la estación, así como la emisión de los pulsos láser en las cámaras astronómicas. (Fuente: ROA)

de la estación, en la que se llevó a cabo la sustitución de la antigua montura de seguimiento (proyecto AMELAS³¹). El objetivo principal de este proyecto, realizado por la empresa AVS en colaboración con el ROA, era incrementar el rendimiento observacional y la calidad de las mediciones mediante la implementación de una nueva montura (figura 7) basada en un sistema de apuntamiento absoluto y que incluye también un nuevo sistema de control tanto a nivel *hardware* como *software*.

Puesto que la instalación de la nueva montura obligó a detener la operativa de la estación, los meses en parada fueron aprovechados

para hacer obras en el edificio de la estación, rediseñar el *rack* principal de control, la mesa óptica y el camino óptico, así como instalar nuevo equipamiento para el control de la estación, eliminando por completo todo el sistema de control de la estación antigua (figura 8).

La estación SFEL continúa avanzando en un proceso permanente de renovación y desarrollo, tanto en *software* como en *hardware*. Aún quedan frentes abiertos, pero el ROA está involucrado de pleno en este esfuerzo para seguir ampliando y mejorando las capacidades de la estación. Entre las actuaciones previstas

31. Para el proyecto AMELAS se contó con la empresa AVS, que se encargó del diseño, fabricación e instalación de la nueva montura, así como de su electrónica de control. AVS participó también, junto con el personal de la estación en el desarrollo del nuevo *software* de control de la montura, que fue posteriormente integrado en el resto del sistema de control de la estación por parte del personal de la estación.

a medio plazo se encuentran la integración de un nuevo banco láser con capacidad de emisión en kHz, la de un telescopio de mayor apertura (80 cm) y la de una nueva cúpula. Además, otros desarrollos ya han comenzado, como el de un nuevo sistema de detección, de diseño modular, que integrará sensores, cámaras astronómicas, optomecánica y otros subsistemas asociados, y que se prevé que entre en servicio durante 2026. Estos proyectos permitirán seguir reforzando las capacidades de la estación y afrontar con garantías los nuevos retos técnicos y operativos de los próximos años.

Participación internacional

La estación SFEL es pionera de la técnica SLR y la más antigua de las tres que actualmente hay en España. Cuenta con capacidad para el seguimiento tanto de satélites geodésicos y activos como de basura espacial (Catalán *et al.*, 2016).

Actualmente, la estación SFEL colabora en el ILRS y su nodo europeo EUROLAS, que agrupa a las principales estaciones SLR en Europa. La participación española en esta red es fundamental para estudios geodésicos avanzados,

como la determinación del ITRF o el análisis de fenómenos geofísicos. La ubicación estratégica de San Fernando en el suroeste europeo convierte a la estación SFEL en un lugar clave para completar la cobertura global en el seguimiento de satélites en órbitas medias y bajas.

Por otro lado, el sistema español S3T, coordinado por el CDTI³², integra instituciones como el ROA, el INTA³³ y empresas tecnológicas para monitorizar basura espacial y prevenir colisiones. S3T forma parte del programa europeo EU SST³⁴, al que aporta capacidades nacionales de vigilancia y seguimiento espacial. Dentro de esta red, la estación SFEL contribuye con su capacidad de telemetría láser, empleada para caracterizar con precisión basura espacial y otros objetos en órbita LEO. Los datos proporcionados por el ROA son importantes para generar alertas de posibles colisiones y para mantener actualizado el catálogo europeo de objetos espaciales.

Además de las redes anteriormente citadas, actualmente la estación SFEL participa activamente en los siguientes proyectos e iniciativas:

LASERGRID (EU SST-SDLR R&D on *Laser Contribution*), financiado por la Unión Europea, enfocado a la contribución de la tecnología

32. El Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI) es una Entidad Pública Empresarial, dependiente del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, que promueve la innovación y el desarrollo tecnológico de las empresas españolas. Es la entidad que canaliza las solicitudes de financiación y apoyo a los proyectos de I+D+i de empresas españolas en los ámbitos estatal e internacional.

33. El Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial es el Organismo Público de Investigación (OPI) dependiente del Ministerio de Defensa. Además de realizar actividades de investigación científica y de desarrollo de sistemas y prototipos en su ámbito de conocimiento, presta servicios tecnológicos a empresas, universidades e instituciones.

34. *European Union Space Surveillance and Tracking* (Vigilancia y Seguimiento Espacial de la Unión Europea), es un programa de la Unión Europea dedicado a la vigilancia y seguimiento de objetos en órbita, como satélites activos y basura espacial, con el fin de prevenir colisiones en el espacio y proteger infraestructuras críticas (por ejemplo, satélites de navegación y comunicación).

35. ESA (European Space Agency/Agencia Espacial Europea) es una organización intergubernamental dedicada a la exploración del espacio, la investigación científica y el desarrollo de tecnologías espaciales, integrada por 22 Estados miembros europeos.

láser en la mejora de la capacidad de la EU SST.

DLTN (*Debris Laser Tracking Network*), financiado por la ESA³⁵, una red centrada en rastrear objetos no cooperativos, como basura espacial.

MOSAIC: *Enhancement of Spanish SST System-S3T*, financiado por la ESA, cuyo objetivo es mejorar las capacidades del sistema español de vigilancia y seguimiento espacial mediante la integración de nuevos sensores y tecnologías avanzadas.

Conclusiones

Durante 60 años, la técnica SLR ha experimentado una gran evolución, desde sus orígenes —con sistemas manuales de baja cadencia y precisiones del orden de pocos metros— hasta estaciones automatizadas con precisiones cercanas al milímetro. Actualmente, la técnica continúa perfeccionándose para dar respuesta a la creciente demanda de seguimiento de satélites y objetos no cooperativos, al tiempo que se busca mejorar la precisión y la eficiencia de las mediciones.

España desempeña hoy un papel relevante en las redes internacionales gracias a la presencia de estaciones modernas, como IZIL e YLARA, así como SFEL, más antigua pero inmersa en pleno proceso de modernización para reforzar su contribución. En este contexto, destaca la aportación directa de la Armada a través de esta última estación, operada por el ROA, lo que evidencia la implicación de nuestras Fuerzas Armadas en la vigilancia, el seguimiento y la mejora de la seguridad espacial global. Estos esfuerzos consolidan la

participación activa de nuestro país en redes internacionales, tanto científicas como operativas, reforzando la cooperación entre instituciones civiles y militares en este ámbito. Además, la técnica SLR está ampliando sus horizontes hacia nuevas aplicaciones emergentes, como la transferencia de datos, la sincronización temporal precisa y la transferencia de momento para la mitigación de basura espacial. Estas líneas de desarrollo la posicionan como una herramienta de gran potencial para el futuro, no sólo en el ámbito científico, sino también en áreas estratégicas y de defensa.

Esperamos que este artículo le haya servido al lector como una introducción clara y accesible al mundo de la técnica SLR y que contribuya a despertar su interés por esta disciplina de gran impacto, tanto científico como estratégico.

BIBLIOGRAFÍA

- Lemoine, F. (2020): «Section 2: The Role of Laser Ranging», *2016–2019 ILRS Technical Report*. International Laser Ranging Service (ILRS), NASA Goddard Space Flight Center.
- Steindorfer, M. A.; Wang, P.; Koidl, F., & Kirchner, G. (2025): «Space debris and satellite laser ranging combined using a megahertz system». *Nature Communications*, 16, p. 575.
- Rodríguez, José C., & Graham M. Appleby (2021): «Satellite Laser Ranging». *Handbook of Laser Technology and Applications*. CRC Press, 2021, pp. 181–198.
- Yang, W.; Zhao, Y.; Fan, C.; Kang, Z., & Liu, P. (2021): «Real-time range gate control of a satellite laser ranging system based on the heterogeneous processor architecture». *Applied Optics*, 60, pp. 296–305.
- ILRS (2013): «About the ILRS». *International Laser Ranging Service Website*. Acceso junio de 2025, disponible en <https://ilrs.gsfc.nasa.gov/abvout/indexhtml>
- (2016). «About ILRS, History». *International Laser Ranging Service Website*. Acceso junio de 2025, disponible en <https://ilrs.gsfc.nasa.gov/about/history.html>
- (2018): «Data & Products». *International Laser Ranging Service Website*. Acceso junio de 2025, disponible en https://ilrs.gsfc.nasa.gov/data_and_products/
- Kerrest, A. (2001): «Space debris, remarks on current legal issues». *3.rd European Conference on Space Debris*, ESOC, Darmstadt.
- ESA (2024): *ESA's Annual Space Environment Report*. ESA Space Debris Office. European Space Agency. Disponible en https://www.sdo.esoc.esa.int/publications/Space_Environment_Report_ILR0_20240719.pdf
- Li, X.; Lou, J.; Yuan, Y.; Wu, J., & Zhang, K. (2024): «Determination of global geodetic parameters using satellite laser ranging to Galileo, GLONASS, and BeiDou satellites». *Satellite Navigation*, 5, Article 10.
- Matyszewski, M.; Lejba, P.; Jagoda, M., & Tysiąc, P. (2023): «Satellite Laser Ranging technique as a tool for the determination of the Schwarzschild, de Sitter and Lense–Thirring effects». *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 116, pp. 77–84.
- NASA (2014): «How Satellite Laser Ranging Got Its Start 50 Years Ago. NASA Goddard Space Flight Center». Acceso junio de 2025, disponible en <https://www.nasa.gov/technology/how-satellite-laser-ranging-got-its-start-50-years-ago/>
- Shelus, P. J. (2001): «Lunar Laser Ranging: Glorious Past And A Bright Future». *Surveys in Geophysics*, 22, pp. 517–535.
- Kirchner, G., & Koidl, F. (2003): «Graz kHz SLR System: Design, Experiences and Results». *14.th International Workshop on Laser Ranging*.
- Kirchner, G.; Koidl, F.; Friederich, F.; Buske, I.; Völker, U., & Riede, W. (2013): «Laser measurements to space debris from Graz SLR station». *Advances in Space Research*, 51(1), pp. 21–24.
- Zhongping, Z.; Huarong, D.; Kai, T.; Zhibo, W., & Haifeng, Z. (2017): «Development of Laser Measurement to Space Debris at Shanghai SLR Station». *7.th European Conference on Space Debris*.
- Wilkinson, M., et al. (2018): «The next generation of Satellite Laser Ranging Systems». *Journal of Geodesy*, 93(11), pp. 2.227–2.247, doi:10.1007/s00190-018-1196-1
- Wang, P., et al. (2022): «Day-and Night-time SLR at MHz Repetition Rate in Graz». ILRS, Yebe, Spain.
- Cordelli, E., et al. (2022): «Ground-based laser momentum transfer concept for debris collision avoidance». *Journal of Space Safety Engineering*, 9(4), pp. 612–624, doi:10.1016/j.jsse.2022.07.004
- Catalán, M., et al. (2019): «San Fernando Laser Station Updates and New Improvements». *Proc. ESA NEO and Debris Detection Conference*, Darmstadt, Germany.
- (2016): «Space debris tracking at San Fernando laser station». *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 48, pp. 103–106.

Fragata F-102 *Almirante Juan de Borbón*,
buque de mando de la SNMG-1, atracada
en el puerto de Stavanger (Noruega)
durante su despliegue en aguas
del norte de Europa. Febrero 2026.
(Foto: Alfonso Vierna Grosso)

