

# EL GPS ESTELAR (II)

José Luis GUTIÉRREZ SACRISTÁN  
Ingeniero de Telecomunicación  
Cuerpo de Ingenieros Técnicos de Arsenales  
de la Armada

Sergio BORRALLO TIRADO



## Introducción



N la primera parte de este artículo, publicada en el número de octubre de 2022, se expusieron diversas técnicas destinadas a la creación de sistemas redundantes para la navegación en alta mar que pudieran ser de utilidad en situaciones de indisponibilidad de los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) (1). Se centró la atención en la aplicación de observaciones astronómicas en combinación con métodos independientes de recepción o transmisión de señales de radio, para resolver el problema de la navegación de acuerdo con los niveles de disponibilidad operativa y precisión esperados hoy en día.

Se exploró una variedad de soluciones, desde la introducción de las mediciones realizadas manualmente con el sextante en el sistema informático de navegación del barco hasta el uso de sistemas de navegación astroinercial inspirados en aplicaciones aeroespaciales, pasando por el empleo de sensores ópticos de horizonte. El primer artículo concluyó presentando la posibilidad de emplear fotografías digitales de trazas de satélites artificiales en el cielo nocturno, extrayendo de estas los puntos de referencia necesarios para la triangulación geométrica de la posición del observador (figura 1).

---

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



Figura 1. Triangulación mediante la observación de un mismo satélite artificial desde tres estaciones base diferentes. Desde cada punto se observa el satélite sobre una región distinta del fondo de estrellas. Conocidas las coordenadas geográficas de dos estaciones base, se puede determinar la ubicación de la tercera por métodos geométricos. (Fuente: NOAA)

A lo largo de las páginas de esta segunda entrega desarrollamos en más profundidad la última idea. Comenzamos presentando los antecedentes históricos y los principales aspectos instrumentales. A continuación, examinamos las peculiaridades del método fotogramétrico (2) propuesto y seguidamente procedemos a justificar la selección de satélites que permita obtener los mejores resultados. Por último, nos adentramos en los aspectos matemáticos relacionados con la fusión de los datos proporcionados por los instrumentos de navegación disponibles en un buque moderno, con los resultados de las observaciones de satélites artificiales, para hallar una solución conjunta lo más confiable y exacta posible al problema del posicionamiento.

---

(2) La fotogrametría es la técnica que permite la extracción de medidas tridimensionales a partir de fotografías bidimensionales de un mismo objeto, tomadas desde diferentes ángulos.

## Antecedentes

La idea de utilizar observaciones ópticas de satélites artificiales para el posicionamiento se remonta a finales de la década de 1950, cuando se pusieron en órbita los primeros satélites artificiales. En 1963, el Servicio Geodésico y de Costas de Estados Unidos (3) puso en marcha el Programa Nacional de Triangulación Geométrica por Satélite (4) para la determinación de la posición relativa de estaciones geodésicas situadas a miles de kilómetros de distancia mediante el análisis de fotografías de satélites artificiales atravesando un fondo de estrellas.

Las primeras observaciones se realizaron sobre los satélites del proyecto *Echo* (5), empleando la cámara balística (6) BC-4 del fabricante suizo Wild Heerbrugg, una de las más avanzadas de su época, especialmente por su capacidad de sincronización de las exposiciones con señales de temporización recibidas por radio. Las observaciones fotográficas del satélite *Echo 1* —situado en una órbita circular de unos 1.600 km de altitud— demostraron que para lograr conectar con exactitud los *datum* geodésicos (7) de cada continente, resultaría imprescindible



Figura 2. El satélite PAGEOS en una prueba de inflado realizada en 1965 en un hangar de dirigibles en Weeksville, Carolina del Norte. Se pueden observar su gran tamaño (30 m de diámetro) y las propiedades reflectantes de su superficie aluminizada.  
(Fuente: NOAA)

(3) United States Coast and Geodetic Survey (USC & GS). En 1970 se integró en la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA).

(4) National Geometric Satellite Triangulation Program.

(5) El proyecto *Echo*, que incluía los satélites *Echo 1* y *Echo 2*, fue una iniciativa de la NASA para estudiar la viabilidad de las comunicaciones de radio por satélite.

(6) Una cámara balística es una cámara fotográfica que realiza exposiciones múltiples en la misma placa para registrar la trayectoria de un proyectil, misil o cohete. También se han empleado para fotografiar satélites artificiales en sus trayectorias orbitales.

(7) Un *datum* geodésico es un marco de referencia utilizado en geodesia y cartografía para definir la posición y las coordenadas de puntos en la Tierra. Es esencial para la alineación y

disponer de satélites en órbitas más altas. Con este fin, mediante una colaboración con la NASA, se realizó el diseño, fabricación y puesta en órbita en 1966 del satélite PAGEOS (8) (figura 2). La órbita elegida, de tipo polar y con una excentricidad muy pequeña, tenía 4.200 km de altitud.

Gracias al nuevo satélite, se pudo extender el programa a un ámbito global, con la incorporación de numerosos socios internacionales (9) bajo la coordinación de Hellmut H. Schmid (10), derivando en el Programa Mundial de Triangulación Geométrica por Satélite (11). Desarrollado entre 1969 y 1974,

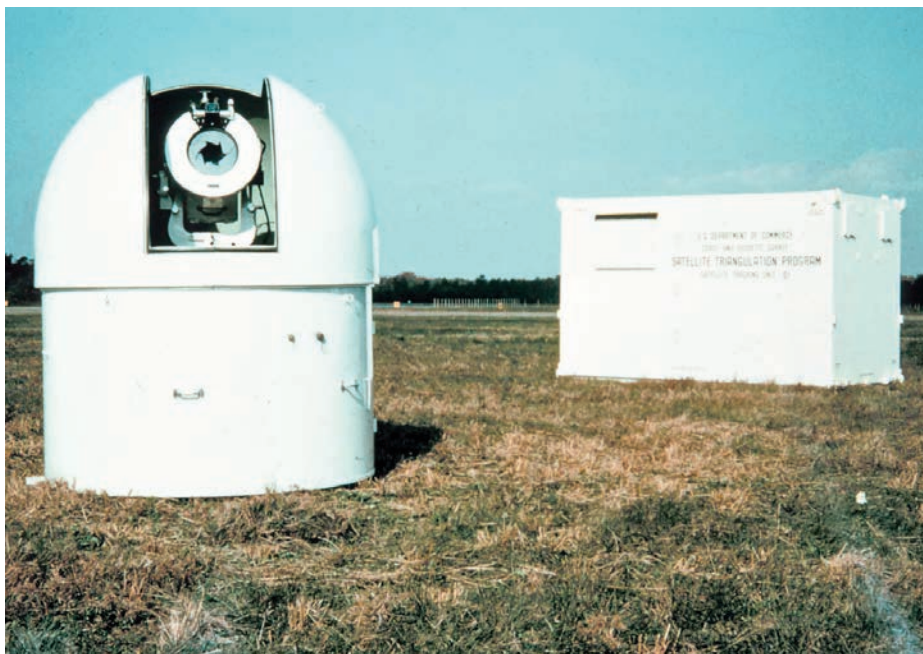


Figura 3. Cúpula de la cámara BC-4 utilizada en el Programa Mundial de Triangulación Geométrica por Satélite. El contenedor de la derecha albergaba los equipos electrónicos de sincronización. (Fuente: NOAA)

---

compatibilidad de datos geográficos, asegurando la consistencia y la correcta interpretación de la información espacial.

(8) *Passive Geodetic Earth Orbiting Satellite*.

(9) Con las notables excepciones de la Unión Soviética y la República Popular China.

(10) Hellmut Heinrich Schmid (1914-1998) fue un reconocido geodesta alemán. Al finalizar la Segunda Guerra Mundial se trasladó a Estados Unidos, llegando a convertirse en la figura más destacada en el desarrollo de la geodesia mediante el uso de satélites.

(11) Worldwide Geometric Satellite Triangulation Program.

culminó con el establecimiento de 45 estaciones geodésicas equipadas con cámaras BC-4 repartidas por todos los continentes (figura 3). Los datos obtenidos permitieron alcanzar una incertidumbre en el posicionamiento del orden de  $\pm$ cinco metros en casi todas las estaciones (Schmid, 1974). Estas observaciones, complementadas con más fotografías del satélite PAGEOS capturadas con las cámaras Baker-Nunn (12) del Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO), tuvieron un papel destacado en la elaboración del Sistema Geodésico Mundial (13) de 1972.

El satélite PAGEOS sufrió una colisión en órbita en 1975, quedando destruido, aunque en 1974 ya habían finalizado oficialmente las observaciones fotográficas en el seno del programa de triangulación. La mejora e implementación gradual de los satélites Doppler (14), la telemetría láser de satélites (15) y el desarrollo del sistema de radionavegación NAVSTAR-GPS (16) en los años subsiguientes desplazaron completamente a las técnicas de seguimiento óptico de satélites en el ámbito de la geodesia. No obstante, debido a su naturaleza intrínsecamente pasiva (no necesitan la transmisión activa de ningún tipo de señal desde o hacia los satélites) e independiente de las ondas de radio, y gracias a las capacidades de los instrumentos ópticos digitales modernos, están atrayendo cada vez más interés como potencial método de respaldo para el posicionamiento y la navegación (Pierce, 2014).

## Aspectos instrumentales

La navegación mediante observación fotográfica de satélites artificiales requiere instrumentos diferentes de los típicamente asociados con la navegación tradicional (como el sextante, la alidada, la brújula o la corredera). El

---

(12) Una de estas cámaras se instaló en las dependencias del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando en 1958, contribuyendo a observaciones de este tipo hasta 1979. Tres décadas más tarde, se realizó un proyecto de recuperación y modernización que culminó con la inauguración del Telescopio Fabra-ROA en el Montsec (TFRM) en 2010 y con su continua participación en programas de vigilancia espacial, españoles y europeos, desde 2015 hasta la actualidad.

(13) *World Geodetic System* (WGS). Es un estándar gestionado por los Estados Unidos ampliamente utilizado en cartografía, geodesia y navegación. Define un sistema de coordenadas fijo centrado en la Tierra y un *datum* geodésico.

(14) Estos sistemas permiten determinar con precisión la ubicación de un receptor mediante cambios en la frecuencia observada de la señal del satélite debidos al movimiento relativo entre el satélite y el receptor. El primer satélite de este tipo fue el *Navy Navigation Satellite System* (NNSS), también conocido como TRANSIT, utilizado en geodesia y navegación.

(15) *Satellite Laser Ranging* (SLR).

(16) *Navigation Satellite Timing and Ranging-Global Positioning System*.



principal es una cámara fotográfica —instalada en la embarcación y protegida de los elementos mediante un encapsulado estanco—, que se utiliza para capturar imágenes de un satélite artificial mientras éste atraviesa el cielo nocturno estrellado (17).

La cámara empleada debe disponer de un mecanismo de estabilización de tres ejes para contrarrestar el movimiento de la nave durante el tiempo de exposición, y necesita estar equipada con un sensor electrónico de imagen (18) para poder analizar las imágenes capturadas de forma inmediata. También debe incorporar un dispositivo electrónico de temporización que asigne marcas de tiempo precisas a cada imagen.

Las imágenes capturadas se someten a un proceso de reducción astrométrica, que implica la identificación de las trazas del satélite y de las estrellas de fondo, y la medición precisa de sus correspondientes coordenadas en la propia imagen, las cuales se transforman en magnitudes angulares utilizando datos de calibración geométrica. El siguiente paso es la comparación de las coordenadas obtenidas con las posiciones extraídas de catálogos astrométricos (19).

Para la determinación de la posición del observador resulta imprescindible disponer de predicciones orbitales del satélite observado. Si éstas no fuesen lo suficientemente precisas o fiables, será necesario mejorarlas mediante la realización de observaciones simultáneas del mismo satélite desde diferentes estaciones terrestres de referencia (20).

En términos generales, el proceso de captura comienza con la selección del satélite a observar y el apuntado a la región del cielo por la que se espera vaya a transitar. A continuación, la montura debe someterse a un régimen de seguimiento adecuado. En el caso de las estaciones terrestres, se puede optar por fotografiar el satélite a telescopio parado, en régimen de seguimiento sidéreo o realizar un seguimiento continuo del satélite. En los instrumentos móviles embarcados, la modalidad de telescopio parado no es aplicable, debiéndose elegir cualquiera de las otras dos. Para satélites muy tenues es preferible el seguimiento continuo, aunque por razones operativas normalmente es suficiente la captura en régimen sidéreo, lo que facilita el proceso de análisis astrométrico de la imagen.

---

(17) A diferencia del sextante, no es necesario capturar imágenes del horizonte.

(18) Normalmente perteneciente a dos grandes familias: los dispositivos de carga acoplada, *Charge-Coupled Device* (CCD), y los sensores de píxel activo, usualmente identificados con la tecnología de fabricación de semiconductores empleada, conocida como *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS).

(19) Los catálogos astrométricos consisten en una recopilación de posición, paralaje, movimiento propio, brillo, color, etc., de numerosas estrellas y otros cuerpos celestes, normalmente expresadas en un marco de referencia centrado en el baricentro del Sistema Solar.

(20) Las estaciones de referencia son similares a las móviles en los aspectos ópticos, pero pueden emplear monturas y sistemas de protección ambiental (cúpula) más sencillos.

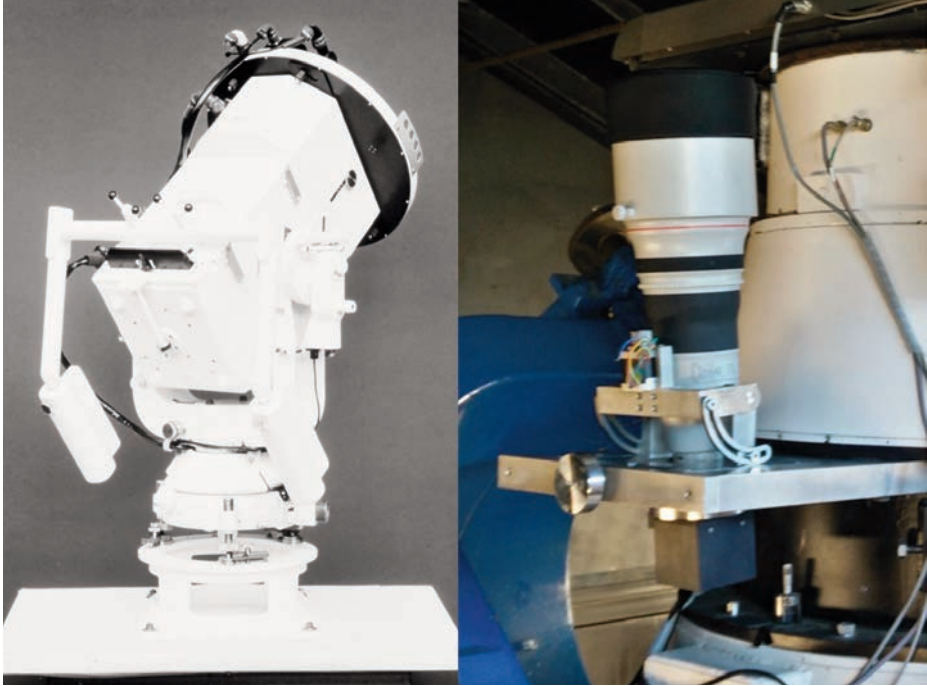


Figura 4. Cámara balística BC-4 (izquierda) y cámara *piggyback* del TFRM (derecha).  
(Fuente: NOAA, ROA)

A continuación, realizamos un examen comparativo entre dos instrumentos empleados para la observación de satélites artificiales: por un lado, la cámara BC-4 del programa de triangulación descrito en los antecedentes (Taylor, 1964), y por otro, una contraparte moderna que podría emplearse como instrumento de navegación, la cámara *piggyback* (21) del Telescopio Fabra-ROA en el Montsec (TFRM) (22) (Canals, 2018). En la figura 4 se puede observar la apariencia de los instrumentos, y en la tabla 1 ponemos a disposición sus principales especificaciones.

(21) Se trata de un dispositivo auxiliar, de menor tamaño, instalado en paralelo al tubo óptico del instrumento principal.

(22) Operado conjuntamente por el Observatorio Fabra y el Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (ROA). Suministra datos para el Programa de Vigilancia y Seguimiento Espacial (SST), coordinado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI), dependiente del Ministerio de Ciencia e Innovación y miembro fundador del consorcio europeo EUSST.

	<b>Cámara del Programa Mundial de Triangulación por Satélite (1969-1974)</b>	<b>Cámara piggyback del TFRM (2017)</b>
Modelo óptica	Wild Heerbrugg BC-4	Canon EF 400 mm f/2.8L IS II USM
Distancia focal	450 mm	400 mm
Diámetro apertura	132 mm	142 mm
Relación focal	f/3.4	f/2.8
Campo de visión	22° x 22°	5° 10' x 3° 30'
Tamaño sensor/placa fotográfica	180 x 180 mm	36.2 x 24.1 mm
Elemento captador de luz	Placa fotográfica de vidrio con emulsión de haluros de plata	Sensor CCD OnSemi KAI-29052
Tipo obturador	Electromecánico de seis láminas en la apertura	Electrónico de tipo <i>Interline Transfer</i> CCD
Sistema de tiempo	Sincronismo por señales VLF	Señal PPS (23) procedente de receptor GPS
Precisión de tiempo	± 100 μs	± 1 μs
Montura	Alt-azimutal manual	Ecuatorial motorizada
Régimen de seguimiento	Telescopio parado	Telescopio parado/sidéreo/trayectoria del satélite
Magnitud límite para astrometría (capturas a telescopio parado)	8-9	12-13

Tabla 1. Comparativa de cámaras de observación de satélites utilizadas en el Programa Mundial de Triangulación Geométrica por Satélite y en el TFRM

A pesar de haber más de cuarenta años entre uno y otro, ambos instrumentos son bastante parecidos en términos de sus especificaciones ópticas principales, como la distancia focal y el diámetro de la apertura. Sin embargo, hay una diferencia considerable en sus prestaciones. Por una parte, llama la atención el menor campo visual de la cámara moderna, debido a que los sensores

---

(23) *Pulse Per Second*. Es una señal que, como su nombre indica, consiste en un pulso cada segundo, sincronizado con un sistema de referencia temporal.





Figura 5. Satélite LAGEOS-1 antes de su lanzamiento en 1976. Destaca su pequeño diámetro (60 cm) y la presencia de 426 retroreflectores alrededor de toda su superficie para su empleo con técnicas de telemetría láser. (Fuente: NASA)

electrónicos de imagen son significativamente más pequeños que las placas fotográficas (24), si bien en el resto de aspectos esta última supera ampliamente a la antigua.

Destaca particularmente la diferencia en sensibilidad a la luz, lo que está acreditado por el tipo de satélites observados por cada instrumento en su uso real: la cámara BC-4 se empleó para la observación del satélite PAGEOS, de 30 m de diámetro, mientras que la *piggyback* del TFRM es capaz de fotografiar nítidamente el satélite LAGEOS-1 (25), de tan sólo 60 cm de diámetro (figura 5), gracias también a su capacidad de operar en un régimen de seguimiento continuo del satélite.

---

(24) No obstante, la imagen formada en el sensor digital es mucho más nítida y se puede compensar la menor superficie mediante la realización de un mayor número de exposiciones, al no ser necesario el cambio y procesado manual de las placas fotográficas.

(25) *LASer GEOdynamics Satellite*.

Un instrumento como este último puede capturar miles de imágenes digitales de trazas de satélites geodésicos y de GNSS en régimen de seguimiento sidéreo durante la duración de una noche, lo que abre posibilidades prácticas para su empleo en navegación, inalcanzables con cámaras basadas en placas fotográficas.

## Fotogrametría

La extracción de información tridimensional a partir de datos astrométricos, necesaria para el análisis de las trayectorias aparentes de los satélites artificiales observados desde diferentes puntos de la superficie de la Tierra, se lleva a cabo a través de técnicas fotogramétricas. En nuestro caso, la complejidad de este proceso se agrava porque el movimiento relativo entre satélite y observador no es uniforme, considerando la combinación del desplazamiento del satélite a lo largo de su órbita con el recorrido que realiza el observador sobre la superficie de la Tierra, también en constante rotación.

Para mitigar estas dificultades, es recomendable trabajar en el marco de referencia del satélite artificial, el cual es de tipo inercial en el contexto de la Teoría de la Relatividad General de Einstein, al poder considerarse que el satélite sigue una trayectoria de caída libre. La principal ventaja de esta aproximación es que permite modelar los rayos de luz como líneas rectas (26).

El método, similar al empleado para predecir zonas de totalidad de eclipses y para el estudio de ocultaciones de estrellas por asteroides, consiste en la aplicación de un procedimiento iterativo para hallar el punto de intersección entre el geode y el hipotético rayo de luz rectilíneo que viene desde las estrellas fijas de referencia y atraviesa el baricentro del satélite artificial, expresando todas las coordenadas en el marco de referencia del satélite artificial anteriormente indicado.

## Selección de satélites

Los satélites artificiales son instrumentales en numerosas aplicaciones (27), requiriendo un tipo de órbita específica y óptima para cada una de ellas. En relación con su observabilidad desde la superficie de la Tierra, se puede realizar una clasificación en cuatro categorías principales: satélites en órbita baja (LEO) (28), geodésicos, GNSS y geosíncronos. En la tabla 2 recopilamos las

---

(26) Sin considerar fenómenos de magnitud mucho menor, como la deflexión gravitacional de la luz debida a la masa de la Tierra y de la Luna.

(27) Por ejemplo, telecomunicaciones, observación de la tierra, astronomía, radionavegación, etcétera.

(28) *Low Earth Orbit*.

	<b>LEO</b>	<b>Geodésicos</b>	<b>GNNS (29)</b>	<b>Geosíncronos</b>
Altitud	<2.000 km	800-13.000 km	19.000-23.000 km	~35.786 km
Período orbital	84-27 min	100-675 min	11-14 h	~24 h
Retroreflectores	No	Sí	Sí	No
Brillo aparente	Alto	Medio-bajo	Bajo	Bajo
Maniobras orbitales	Sí	No	Sí	Sí
Cobertura región polar	Según satélite	Según satélite	Buena	Deficiente
Sombra tierra	Acusada	Apreciable	Poca	Mínima
Forma esférica	No	Sí	No	No

Tabla 2. Comparativa entre satélites artificiales para su selección como puntos de referencia óptica para la navegación

principales características de cada tipo con la finalidad de discriminar cuáles son los más adecuados como puntos ópticos de referencia para el sistema de navegación propuesto.

Los satélites LEO poseen un gran brillo aparente y permiten alcanzar la mayor precisión posible en el posicionamiento por su mayor cercanía a la superficie terrestre, pero presentan como inconvenientes su escasa disponibilidad, al encontrarse en la sombra de la Tierra durante la mayor parte de la noche, y la imposibilidad de ser observados simultáneamente desde alta mar y varias estaciones terrestres por razones geométricas.

Los satélites geodésicos, por el contrario, se ven favorecidos en este último aspecto por su mayor altitud orbital, pero sin llegar a perjudicar en exceso la precisión alcanzable. La fracción de la noche que se encuentran en sombra es algo menor que la de los LEO, aunque su disponibilidad global es deficiente dado el escaso número de satélites de este tipo en órbita. Por otra parte, presentan la ventaja de tener forma esférica, lo que minimiza el desalineamiento entre el baricentro del satélite y su parte más brillante (30), aunque en general tienen un brillo aparente bastante bajo por su forma compacta y tamaño habitualmente pequeño. Por último, al estar equipados con retroreflectores, resultan ideales para su seguimiento mediante técnicas de telemetría láser, lo que facilita la disponibilidad de predicciones orbitales precisas.

(29) *Global Navigation Satellite System*. Normalmente incluyen los sistemas GPS (Estados Unidos), Galileo (Unión Europea), GLONASS (Rusia) y Beidou (China).

(30) Algo a considerar especialmente en comparación con satélites asimétricos o con grandes paneles solares.

Los satélites de las constelaciones GNSS, por estar situados en órbitas más altas, son visibles simultáneamente desde puntos muy distantes. La existencia de un apreciable número de este tipo facilita también la disponibilidad simultánea de varios de ellos, iluminados por el Sol y relativamente cerca del cénit. Al disponer de retrorreflectores, es esperable disponer de efemérides muy precisas, al igual que sucede en el caso de los satélites geodésicos. Estos aspectos los hacen muy versátiles para su uso en navegación óptica. No obstante, es preciso tener en cuenta que su forma no esférica y su mayor lejanía inevitablemente implican una degradación en la precisión en el posicionamiento.

Por último, los satélites geosíncronos (31) pueden interpretarse como un caso límite de los satélites GNSS: su disponibilidad es máxima (excepto desde las regiones polares), pero su mayor distancia perjudica apreciablemente la precisión alcanzable. Por otra parte, las efemérides disponibles no son tan precisas como en el caso de los satélites GNSS o geodésicos, por lo que no son los mejores candidatos para su uso con el método propuesto.

A la luz de lo anterior, con fines ilustrativos, en la tabla 3 se ha seleccionado un conjunto de satélites que destacan por sus adecuadas características para su empleo en navegación mediante observación óptica. Todos pertenecen a la categoría de geodésicos, excepto los tres últimos, que son de GNSS.

## **Integración con los sensores de navegación de a bordo**

La solución propuesta para el posicionamiento mediante la observación de satélites artificiales, a pesar de representar una idea prometedora, presenta importantes limitaciones en algunos escenarios (32). Por este motivo resulta esencial estudiar nuevos enfoques que permitan desarrollar sus potenciales prestaciones en la práctica.

Una vía para la mejora de este sistema podría consistir en hacer uso de los ingentes flujos de datos disponibles a bordo de una embarcación moderna, gracias a la abundancia de sensores electrónicos y otras fuentes de datos a las que se tiene acceso (33). Todos estos elementos nos facilitan información, ya sea de manera continuada o intermitente, que podemos aplicar para aumentar la precisión en el cálculo de la posición.

Con lo indicado previamente no nos referimos únicamente a fuentes de información que nos faciliten directamente (con mayor o menor precisión) la posición del buque, sino a cualquier conjunto de datos de la navegación que

---

(31) En esta categoría incluimos también los satélites geoestacionarios.

(32) No es posible observar los satélites durante el día ni cuando el cielo está cubierto. En condiciones de mala mar también puede ser problemático realizar las observaciones necesarias.

(33) Sistemas inerciales, corredera, girocompás, sonar, radar, magnetómetro, etcétera.

Satélite	NORAD ID (34)	Período orbital (minutos)	Altitud del apogeo (km)	Inclinación
STELLA	22824	101	813	98.9°
STARLETTE	7646	104	1114	49.8°
LARES	38077	115	1459	69.4°
AJISAI (EGS)	16908	116	1504	50.0°
PAGEOS	Actualmente fragmentado	181	4239	87.1°
LAGEOS-2	22195	222	5960	52.6°
LAGEOS-1	8820	225	5955	109.8°
COSMOS 2024 (ETALON-2)	20026	675	19177	65.5°
COSMOS 1989 (ETALON-1)	19751	676	19194	64.4°
COSMOS 2436 (723) (35)	32395	676	19176	64.3°
GPS BIIR-2 (PRN 13)	24876	718	20376	55.6°
GSAT0102 (PRN E12) (36)	37847	845	23236	57.1°

Tabla 3. Período orbital, altitud e inclinación del plano orbital de los principales satélites geodésicos, así como una selección de GNSS. Se incluye el extinto PAGEOS como referencia.

podamos emplear para refinar la estimación de la posición actual, pasada o futura de la embarcación.

El procedimiento que proponemos se basaría en la integración de los flujos de datos mencionados anteriormente, ponderándolos adecuadamente en función de su fiabilidad y disponibilidad en cada momento. Por supuesto, aquí podrían incorporarse también los resultados obtenidos de cualesquiera observaciones astronómicas disponibles (37).

---

(34) *North American Aerospace Defense Command Identification Number*. Es el principal código de identificación de cuerpos en órbita terrestre utilizado actualmente.

(35) Perteneciente a la constelación GLONASS.

(36) Perteneciente a la constelación Galileo.

(37) Por ejemplo, mediciones de alturas de astros realizadas con un sextante, manual o automatizado.



El problema principal al que nos enfrentamos en este paso deriva de la excesiva heterogeneidad de los datos disponibles, procedentes de los diversos sensores del barco, lo que supone un interesante reto de cara a su análisis matemático. Recordamos en este punto que toda esta información deberá ser integrada también con los datos procedentes de la observación de satélites.

El proceso de cálculo requerido para integrar toda la información indicada habría supuesto un reto tecnológico prácticamente insalvable en un pasado no muy lejano por la ingente capacidad de cómputo requerida. Por suerte, hoy en día disponemos de equipos informáticos sobradamente potentes que nos permiten aplicar en tiempo real las técnicas de análisis estadístico más exigentes. Los métodos seleccionados, basados en la inferencia estadística bayesiana, poseen una sorprendente capacidad para encontrar la solución más verosímil al problema de la navegación.

Mediante el establecimiento de una red bayesiana (38), el sistema realiza de forma implícita una serie de simulaciones del problema de la navegación, agregando la información proveniente de todos los sensores y recreando cada uno de los diferentes escenarios posibles. De esta manera, se acaba convergiendo en un conjunto de soluciones que nos sirven para aproximar tanto la posición del buque como la incertidumbre (cota de error) asociada a esta, mediante un promediado entre las soluciones más verosímiles (39).

Desde un punto de vista práctico, para lograr convertirse en una alternativa real y viable a los GNSS, el método de navegación propuesto tiene que presentar las siguientes características:

- Debe ser homogéneo/agnóstico, en el sentido de que debe tratar todas las fuentes de información de la misma manera, sin verse influido por el tipo de fuente ni el origen del flujo de datos. Únicamente debe considerar la información recibida, analizar los datos conforme al nivel de fiabilidad estadísticamente asociado y procesarlos de manera ponderada con el fin de estimar la trayectoria del buque y proporcionar una cota fiable de la incertidumbre.
- Debe ser robusto y adaptable, lo que se manifiesta mediante la capacidad de ajustar dinámicamente la utilización de las fuentes de información en función de la disponibilidad y fiabilidad de las mismas en cada momento, dado que los datos procedentes de los sensores no son, en

---

(38) Una red bayesiana es un modelo probabilístico que representa las relaciones de dependencia condicional entre diferentes variables aleatorias. Permite codificar las relaciones causa-efecto entre las variables de un sistema complejo.

(39) El sistema propuesto considera miles de posibles soluciones al problema del posicionamiento mediante una variación sistemática (dentro del rango de valores estadísticamente esperados) de todas las variables que toman parte en el sistema.

- general, de carácter continuado ni presentan la misma precisión todo el tiempo.
- Debe tener capacidad de análisis retroactivo, es decir, datos recibidos en el presente deben utilizarse para analizar y refinar puntos de posición pasados, realizando una corrección retrospectiva de todas las variables disponibles.

## Conclusiones

La técnica de posicionamiento basada en la observación de satélites artificiales analizada en este artículo emerge como una alternativa prometedora o, al menos, como un útil complemento a los sistemas de navegación marítima actuales. Sus ventajas, como la independencia de los GNSS, cobertura global y alta precisión, la convierten en una opción convincente y merecedora de estudio y desarrollo ulteriores. No obstante, algunos aspectos, como la dependencia de las condiciones de visibilidad, la complejidad técnica de los instrumentos requeridos, la disponibilidad de datos orbitales precisos en tiempo real y el tiempo de procesamiento de las imágenes capturadas, requieren desarrollos significativos.

Por otra parte, la posibilidad de integrar un sistema de estas características con los diversos sensores de navegación de un buque moderno constituye también un área de investigación esencial para la implantación práctica del método propuesto, en la forma de un sistema de posicionamiento marítimo que podríamos denominar «GPS estelar», en alusión a su disponibilidad operativa, fiabilidad y precisión en situaciones de denegación de servicio de GNSS.

## BIBLIOGRAFÍA

- CANALS ROS, L.; NÚÑEZ DE MURGA, J.; LÓPEZ MORCILLO, R.; SER BADIA, D. del; MERINO ESPAÑA, 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)*.
- PIERCE, S.; Raquet, J.; DORLAND, B.; HENNESSEY, G. (2014): «A performance model of an integrated navigation solution using satellite observations from star trackers». *27.<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2014(4)*, pp. 3.231-3.242.
- SCHMID, H. H. (1974): «Worldwide geometric satellite triangulation». *Journal of Geophysical Research*, 79(35), pp. 5.349-5.376.
- TAYLOR, E. A.; LAMPTON, B. F. (1964): «A Report on the Camera Calibration Phase of the C&GS Satellite Geodesy Program». *Photogrammetric Engineering*, XXX(2), pp. 245-250.

Seguimiento de objetos espaciales desde la Estación Láser del ROA en la bahía de Cádiz. (Foto: Víctor de Ory Guimerá)

