



CEU

*Universidad
San Pablo*

**Facultad de Ciencias
Económicas y Empresariales**

La observación de la Tierra: nuevas oportunidades de negocio

María Clara de Lacy Pérez de los Cobos
Catedrática del área de Ingeniería Cartográfica,
Geodésica y Fotogrametría
Universidad CEU San Pablo

Festividad de San Vicente Ferrer
Abril de 2024



CEU | *Ediciones*

La observación de la Tierra: nuevas oportunidades de negocio

María Clara de Lacy Pérez de los Cobos
Catedrática del área de Ingeniería Cartográfica,
Geodésica y Fotogrametría
Universidad CEU San Pablo

Festividad de San Vicente Ferrer
Abril de 2024

**Facultad de Ciencias
Económicas y Empresariales
Universidad CEU San Pablo**

La observación de la Tierra: nuevas oportunidades de negocio

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

© María Clara de Lacy Pérez de los Cobos, 2024

© de la edición, Fundación Universitaria San Pablo CEU, 2024

CEU *Ediciones*

Julián Romea 18, 28003 Madrid

www.ceuediciones.es

Maquetación: Andrea Nieto Alonso (CEU *Ediciones*)

Depósito legal: M-9851-2024

Cuando el decano me propuso preparar la lección de la festividad de San Vicente Ferrer, lo primero que pensé fue: “¿Qué voy a contar yo en una Facultad de Económicas?” Con este horizonte, comenzamos y lo hago implorando indulgencia.

Siempre hemos tenido curiosidad por conocer nuestro planeta. En particular, nos hemos interesado por su **forma**, sus **dimensiones** y su **dinámica**. Desde tiempos de los griegos se ha discutido sobre la esfericidad de la Tierra. La controversia del aplastamiento terrestre se convirtió en “tendencia” en el siglo XVIII al enfrentar a Cassini y a Newton. Defendía el primero que era alargada por los polos y achatada por el Ecuador, mientras que Newton opinaba lo contrario. España fue protagonista de excepción en la solución de este dilema que se basaba en la medición de un grado de arco de meridiano en las cercanías del polo norte y otro en la zona ecuatorial. La expedición científica que se desplazó a América estaba integrada por prestigiosos y experimentados científicos franceses como Godin, Bouguer y La Condamine, mientras que por parte de España, se confió la misión a los “veinteañeros” guardias marinas, Jorge Juan y Antonio de Ulloa. Ambos fueron ascendidos de golpe a tenientes de navío ante el temor de que no fueran respetados por los miembros franceses de la expedición. La juventud y formación militar y académica de los españoles fue crucial en el desempeño de la misión (Guillén, 1973). Después de las correspondientes observaciones geodésicas y astronómicas, la expedición estimó que el radio terrestre en el Ecuador medía aproximadamente 6378.388 km frente a los 6356.515 km estimados por la expedición enviada a Laponia, (González, 2013). Con estos resultados, se concluía que la Tierra era un elipsoide achatado por los polos y ensanchado por el Ecuador. Posteriormente, en el siglo XIX y siempre con el objetivo de conocer la forma y el tamaño de la Tierra, se proyectó la medida de un arco de meridiano desde las islas Shetland, en el norte de Escocia, hasta el Sahara. Dicho proyecto estuvo interrumpido durante mucho tiempo por la dificultad de las mediciones entre el sur de España y el Norte de África. El problema fue resuelto por el General español Ibáñez de Ibero ayudado por el comandante francés de Estado Mayor Perrier. Así, en 1879 se realizó el primer enlace geodésico y astronómico entre Europa y África, materializando la unión entre

ambos continentes mediante triangulación (figura 1). Es importante resaltar, que en aquel entonces las observaciones geodésicas requerían la visibilidad de los vértices o puntos de observación involucrados, lo que convertía este trabajo en un reto en el que ya habían fracasado otros anteriormente. Las observaciones se realizaron en los vértices de Mulhacén y Tetica en España y Filhaoussen y M'Sabina en Argelia (Verdú, 2007). Los observadores del vértice de Mulhacén sufrieron grandes penalidades e inclemencias meteorológicas, incluyendo fuertes vendavales, tempestades y nevadas en el mes de septiembre. Como reconocimiento a sus trabajos científicos y en especial a este enlace con Argelia, le fue concedido al General Ibáñez de Ibero el título de primer marqués de Mulhacén. Tuvieron que pasar 100 años, para que ya en el siglo xx y con la era de los satélites artificiales empujando de forma incipiente, se retomaran las observaciones entre ambos continentes.



Figura 1. Plano general del enlace hispano-argelino.

El lanzamiento de los primeros satélites artificiales, a comienzos de la década de los 60 del siglo xx, cambió radicalmente nuestra forma de ver la Tierra.

Cuando impartía la asignatura de Geodesia por satélites en la titulación de Topografía en la Universidad de Jaén me gustaba empezar las clases con la siguiente figura:

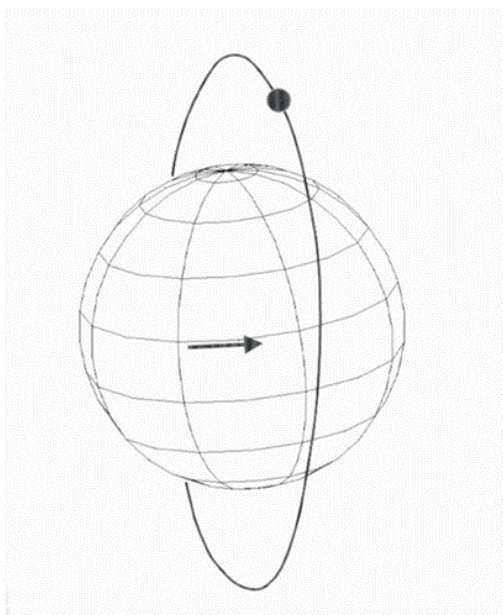


Figura 2. Ejemplo de un satélite observando la Tierra.

Es una figura en blanco y negro, sin animación, de apariencia simplona pero que, a mi modo de ver, ayuda a comprender lo que hoy en día entendemos por observación de la Tierra. Tenemos un satélite en órbita polar junto a una esfera que representa la Tierra y una flecha que quiere simbolizar su movimiento de rotación. Combinando adecuadamente el movimiento orbital del satélite con el de la Tierra, el satélite “barre” la Tierra en su **globalidad en períodos breves de tiempo**. Hasta entonces, la realización de observaciones requería la visibilidad de los puntos involucrados. Ahora obtenemos los datos a partir de satélites, que cuando es necesario se convierten en el nexo de unión entre los puntos involucrados (figura 3). Los satélites, por tanto, observan la Tierra desde el espacio aportando un nuevo punto de vista a la resolución de problemas que siempre han convivido con nosotros.

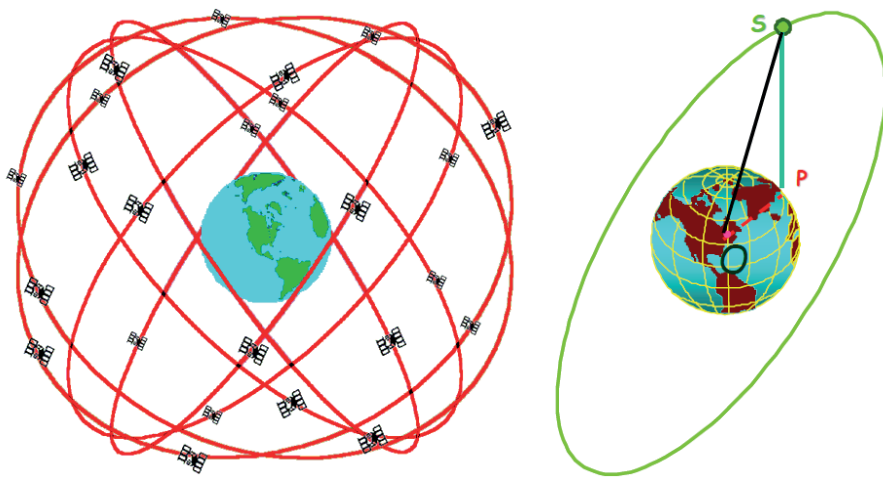


Figura 3. Constelación de satélites y conexión puntos terrestres.

Además de la forma de la Tierra, también nos ha preocupado entender su dinámica. Vivimos en un planeta en constante transformación. Sufre cambios en su superficie sólida, en la atmósfera y en la hidrosfera. Podemos decir, por tanto, que habitamos en un planeta “inquieto” que nos envía constantemente señales acerca de sus inquietudes. Hasta hace poco, no éramos capaces de poder escuchar los mensajes que nos enviaba. El lanzamiento de los satélites artificiales al espacio lo cambió todo por completo. Los satélites nos van a permitir poder escuchar con cierta claridad sus mensajes y ello nos va a llevar a tratar de entenderla para mejorar nuestra convivencia. Muchas de sus “reacciones” no las podemos evitar, pero si somos capaces de predecirlas, ganaremos mucho. Sirva como ejemplo la evacuación de la población civil durante la erupción del volcán de Cumbre Vieja, en septiembre de 2021, que se realizó en consonancia con los registros de vigilancia volcánica.

En palabras del profesor Brunini de la Universidad de La Plata, son cinco los **problemas que por su globalidad o envergadura no pueden resolverse sin la ayuda de los satélites** (Brunini, 2021). Estos problemas están relacionados con el cambio del nivel del mar, el ciclo o dinámica del agua, los fenómenos meteorológicos extremos, los riesgos geológicos donde se incluyen los terremotos, erupciones volcánicas y tsunamis y la dinámica de los ecosistemas, donde es de especial actualidad la desertificación. Son muchos los satélites que orbitan en el espacio con la misión de ayudarnos a comprender estos fenómenos. Llevan a bordo sensores que en muchos

casos toman imágenes de la Tierra y de ahí viene la denominación de observación de la Tierra. Yo, sin embargo, en esta charla me voy a tomar la licencia de definir la observación de la Tierra como la utilización de observaciones a satélites, de satélites o entre satélites para la resolución de retos y problemas que se presentan en la Tierra, algunos de ellos relacionados con la comprensión de los cambios globales que sufre la Tierra. De este modo, incluimos aquí diversas técnicas como el GNSS (Global Navigation Satellite System), SLR (Satellite Laser Ranging) o DORIS (Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite) que no toman imágenes directamente, pero que de sus datos se desprende información relevante que nos ayuda a entender las señales que nos envía nuestro planeta y también, a cuantificarlas. Centrémonos por un momento en el estudio del cambio del nivel del mar que podemos ver en la figura 4. Podemos observar una serie temporal desde 1993 a 2017 que nos muestra las variaciones del nivel del mar. Vemos una tendencia creciente del orden de 3 mm/año. Otro ejemplo puede ser la velocidad de convergencia entre las placas africana (Nubia) y euroasiática. Fue cuantificada por primera vez a partir de observaciones GPS (Global Positioning System) en 2015. Dentro del proyecto Topolberia, estimamos una velocidad anual de acercamiento de la placa africana a la europea de aproximadamente 4.5 mm/año, (Gárate *et al.* 2015). La sismicidad que presenta el sur de España se explica en parte, por su situación en la zona de convergencia de estas dos placas tectónicas (figura 5). Ambos ejemplos ponen de manifiesto que para discriminar las magnitudes de los fenómenos a estudiar, se necesita extremar la precisión tanto en las técnicas observacionales y computacionales como en modelos los matemáticos utilizados.

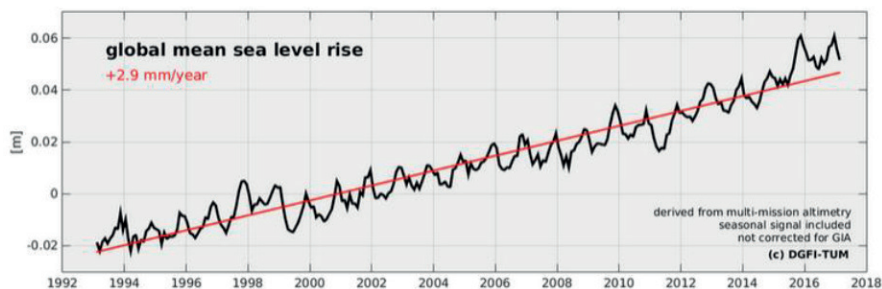


Figura 4. Serie temporal del nivel medio del mar desde 1993 a 2018.

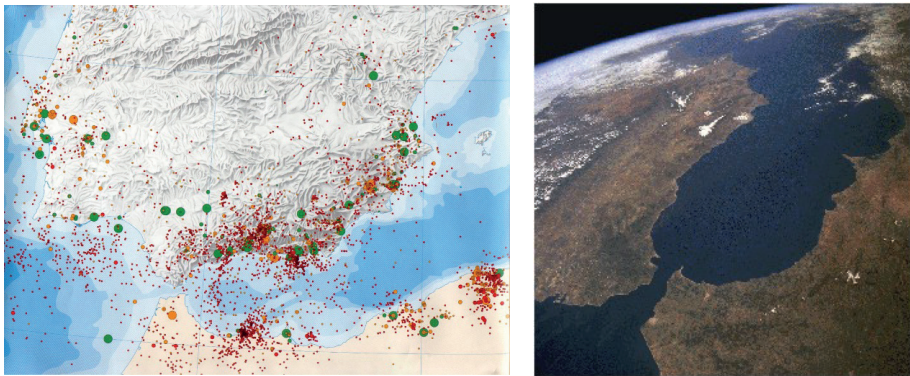


Figura 5. Sismicidad entre los límites de la placa africana y euroasiática.

La figura 6 resume el papel de **los satélites como sustento de otras disciplinas** en la resolución de problemas de carácter global. En la cúspide tenemos los cinco retos que nos proponemos resolver y que son observados de forma continua desde el espacio, es decir los sensores a bordo de los satélites “no nos quitan ojo”. A partir de sus datos y los correspondientes modelos matemáticos, obtenemos series temporales en las que buscamos variaciones pequeñísimas que constituyen las señales que envía el planeta para advertirnos de que algo está cambiando. Pero nuestro planeta “inquieto” mientras es observado desde arriba, está rotando sobre su propio eje y además está actuando el campo de gravedad. Fenómenos que no podemos olvidar ni despreciar, si queremos entender lo que realmente está ocurriendo. Teniendo en cuenta, que estamos tratando de resolver problemas globales, todo debe tener una **referencia común** milimétrica que se consigue con la ayuda de una “superestructura” terrestre que gobierna todo lo que ocurre en el espacio. La profesora Laura Sánchez, actual presidente del Servicio de Observación Geodésico Global (<https://ggos.org/>), se refiere a esta infraestructura como nuestra “caja de herramientas”.

Si miramos bien la figura 6, como sustento de otras disciplinas como la Climatología, la Meteorología, o la Geofísica aparece el término Geodesia. Los geodestas sabemos que decir Geodesia espanta, sin embargo, hablar de la observación de la Tierra suena mucho más bonito y ni que decir tiene que si lo relacionamos con la sostenibilidad se abren muchas puertas. Sirva como ejemplo que el 26 de febrero de 2015, el plenario de las Naciones Unidas aprobó la primera resolución de tipo “geoespacial” sobre el marco de referencia geodésico para el desarrollo sostenible. Esto implica el compromiso

de considerar la Geodesia como área estratégica para el desarrollo sostenible y la correspondiente asignación de presupuesto gubernamental para la instalación y mantenimiento de la superestructura mencionada anteriormente.



Figura 6. La Geodesia como sustento de otras disciplinas, (Brunini, 2021).

En la figura 7, podemos ver sensores terrestres, aéreos y espaciales junto con su correspondiente estructura en Tierra que los gobierna. Los satélites se encuentran a distintas altitudes sobre la superficie terrestre. Se tienen los satélites de órbita baja y media que en la figura 7 aparecen representados con sus siglas en inglés LEO (Low Earth Orbit) y MEO (Medium Earth Orbit). Dentro de estos últimos se incluyen los sistemas de posicionamiento y navegación, los sistemas GNSS (Global Navigation Satellite System) que son los más utilizados no sólo con fines científicos si no también comerciales. En ellos nos vamos a centrar a partir de ahora porque son los más extendidos y además aquellos a los que yo dedico el “tiempo libre”.



Figura 7. “Caja de herramientas” de la Observación de la Tierra (Laura Sánchez, 2020).

Podríamos pensar que no conocemos los sistemas GNSS, pero estoy segura que no es así. Los tenemos muy arraigados a nuestra vida y casi que me atrevería a decir que ya no sabemos vivir sin ellos. Baste como ejemplo, lo que hacemos todos o la mayoría de nosotros cuando vamos en coche por vez primera a un lugar desconocido. Le pedimos al navegador del coche que nos lleve y con frecuencia hablamos de él con poca propiedad y lo llamamos GPS. Desde hace algunos años, hemos cambiado la denominación GPS por GNSS para incluir todos los sistemas de navegación y posicionamiento que existen hoy en día.

En los años 70 del siglo pasado nace la primera constelación de satélites de posicionamiento con fines militares que es gestionada por el Ministerio de Defensa de los Estados Unidos y que transmite al usuario la información relativa a sus satélites. Información imprescindible para la realización de cualquier trabajo de posicionamiento. Eso significa que en caso de conflicto bélico, el Ministerio de Defensa de los EE. UU. puede alterar o falsear dicha información adquiriendo una amplísima ventaja frente a sus rivales. Es por ello, por lo que Rusia también desarrolla el sistema de navegación denominado GLONASS, China el sistema denominado BeiDou y Europa ha implantado el sistema Galileo (figura 8). Este último, en principio, con fines civiles. Además, existen dos sistemas de navegación regionales que son el japonés QZSS (Quasi Zenital Satellite System) y el indio, denominado IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System). A ellos se suman los sistemas de apoyo regionales como el europeo EGNOS o el americano WAAS. En total, se tienen más de cien satélites de posicionamiento y navegación con su correspondiente infraestructura terrestre. Todos ellos se engloban

bajo las siglas GNSS, (Hofmann-Wellenhof *et al*, 2012). Los satélites constituyen el denominado segmento espacial mientras que los distintos receptores terrestres forman el denominado segmento de usuario.

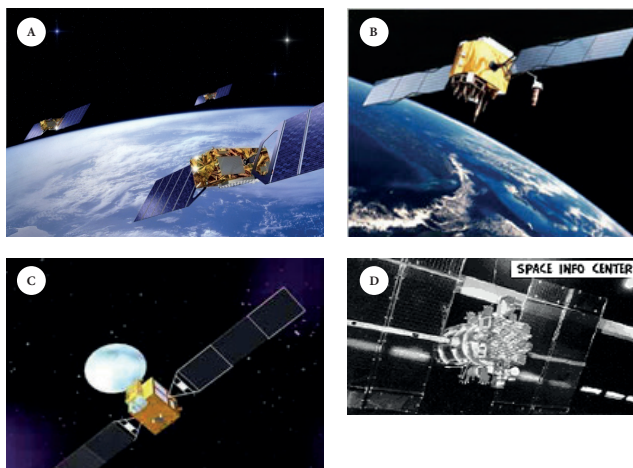


Figura 8. Satélites GNSS de diversos sistemas de navegación:

A) Galileo (Europa); B) GPS (EE UU); C) BeiDou (China); D) GLONASS (Rusia).

En la figura 9 se pueden ver algunos ejemplos de receptores GNSS de distintos precios y calidades que reciben la señal procedente de los satélites y conforman el denominado sector de usuario. El más barato cuesta pocos cientos de euros y el más caro puede superar los 24.000 euros (figura 9C).

Los distintos sistemas de navegación están diseñados para operar conjuntamente en tiempos de paz y funcionar de forma autónoma en tiempo de guerra. Las **alteraciones de la señal GNSS** en tiempos de guerra son frecuentes. Pueden producirse mediante interferencias y suplantación de la señal. La interferencia puede llegar a anular las señales para que no funcionen según lo previsto, mientras que la suplantación puede crear señales falsas. Durante la guerra de Ucrania, no sólo se han detectado ubicaciones falsas de buques y aviones de guerra, sino que la vulnerabilidad del GPS ha impedido el vuelo de drones no tripulados. Esta vulnerabilidad se conoce desde hace mucho tiempo, pero ha sido el actual contexto bélico el que ha relanzado la necesidad de adoptar tecnologías de respaldo alternativas. Una de ellas es el uso del código cifrado M, ya disponible en los satélites más modernos. Tiene el inconveniente de que la mayoría de los receptores no están preparados para su uso. Otra opción es recurrir

a los sistemas inerciales cuando el GPS se apaga o a la clásica orientación celeste, como aún siguen poniendo en práctica en el buque Escuela Juan Sebastián Elcano.

En el desarrollo de alternativas al GPS, ha visto el sector privado una nueva oportunidad. Estas alternativas no reemplazarán al GPS pero desarrollarán tecnologías complementarias o de respaldo. Así por ejemplo, la empresa Xona Space Systems planea para 2025 comenzar a construir una constelación de satélites pequeños de órbita baja. Esta empresa, se está asociando con empresas de fabricación de equipos GNSS existentes para integrar el software en sus receptores. Otra empresa emergente, preparada para competir en este mercado, es TrustPoint que ya ha lanzado al espacio dos satélites de prueba y que planea construir una red de 300 satélites de órbita baja. DeMay, líder de Stonnan, dice que el GPS es la próxima oportunidad para la tecnología de doble uso. Por su parte, Alison Brown, directora ejecutiva de Navsys asegura que se demostrará que se pueden utilizar satélites comerciales como alternativas a los sistemas actuales de posicionamiento, navegación y sincronización (PNT), (Erwin, 2024).

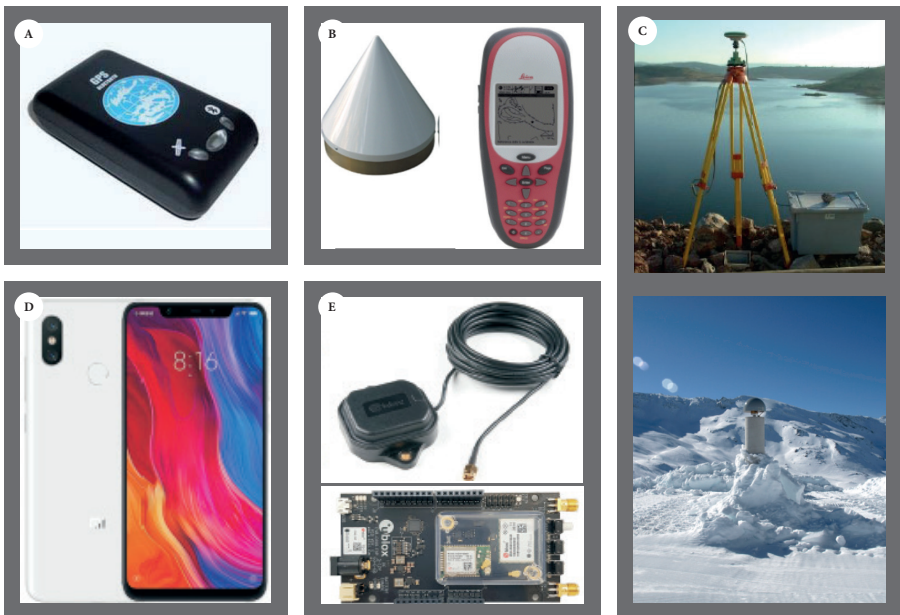


Figura 9. Ejemplos de equipos GNSS con diferentes prestaciones: A) navegador; B) antena y receptor GNSS con fines cartográficos; C) un equipo geodésico realizando el control de una presa y otro midiendo en Sierra Nevada para un estudio de tectónica de placas; D) teléfono inteligente con dispositivo GNSS incorporado; E) antena y receptor GNSS de bajo coste.

Hasta ahora hemos visto las aplicaciones científicas y militares de los sistemas GNSS, pero no son menos importantes sus usos comerciales que están siendo fuertemente apoyados por la Unión Europea que está tratando de acercar el espacio a la Tierra. Con este fin, se crea en 2004 la **GSA** (Agencia de GNSS Europea) que posteriormente asume más responsabilidades y se convierte en **EUSPA** (Agencia Europea del Espacio). EUSPA promueve la comercialización de datos y servicios de los satélites europeos, coordina el sector usuario del programa europeo de comunicaciones seguras por satélites y colabora en el seguimiento y vigilancia del espacio. Además, **EUSPA apoya a todos aquellos que quieren comprender el mercado de las tecnologías por satélite, integrándolos en sus planes de negocio o desarrollando nuevas aplicaciones basadas en satélite** (EUSPA EO and GNSS Market Report, 2023). Según el último informe de mercado de EUSPA, los ingresos globales generados por los sistemas GNSS en 2023 alcanzaron los 260.000 millones de euros y se espera que alcancen los 580.000 millones de euros en 2033. Se espera que las ventas mundiales de receptores GNSS superen los dos mil millones de unidades en 2027 (figura 10). En 2033, los servicios asociados a los equipos GNSS generarán más del 80% del total de los ingresos GNSS.

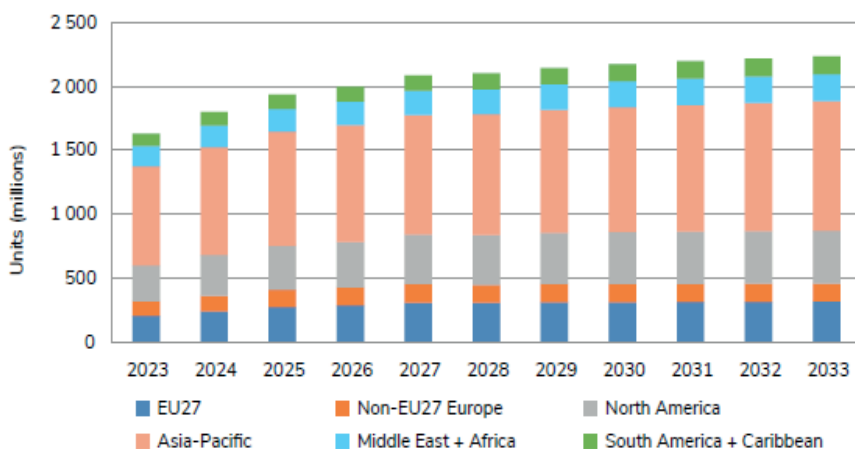


Figura 10. Ventas de dispositivos GNSS (EUSPA EO and GNSS Market Report, 2023).

La industria GNSS se divide en tres categorías: fabricantes de componentes y receptores, integradores de sistemas y proveedores de servicio. Estados Unidos copa el 30% del mercado, seguido de Europa con un 25%, mientras que Japón, China y Corea juntos, les siguen con otro 25%. En la tabla 1, se pueden ver las diez empresas principales de la cadena de valor GNSS. Están ordenadas alfabéticamente y la clasificación se ha hecho en base a los ingresos obtenidos en 2021.

Components & Receivers Manufacturers		System integrators		Added-Value Service Providers		End users
Avago (Broadcom)	US	Apple	US	Alphabet (Google)	US	Users of GNSS-based solutions across the different market segments
Beijing Bdstar Navigation	CN	China First Automobile Group Corporation	CN	Denso	JP	
Garmin	US	Ford	US	ESRI	US	
Hexagon	SE	Garmin	US	Facebook	US	
Kongsberg Maritime	NO	General Motors	US	Garmin	US	
Mediatek	CN	Oppo	CN	Hexagon	SE	
Qualcomm	US	Samsung Electronics	KR	HERE International	NL	
Trimble Navigation	US	Stellantis	NL	Microsoft	US	
United Technologies Corporation	US	Toyota	JP	Tencent	CN	
VALEO	FR	Volkswagen	DE	Trimble Navigation	US	

Tabla 1. Principales empresas de la cadena de valor GNSS en 2021, (EUSPA EO and GNSS Market Report, 2023).

Según EUSPA, son **quince los segmentos de mercado GNSS**. Agrupando algunos de ellos, podemos resumirlos en la siguiente lista:

- **Agricultura:** ha dado lugar a lo que se conoce como agricultura de precisión, donde algunos de sus puntos fuertes son el guiado de maquinaria agrícola, la geolocalización de parcelas, la aplicación de plaguicidas, herbicidas y fertilizantes con mayor precisión, controlando así la dispersión de las sustancias químicas. Todo ello redundando en reducciones en los gastos, un mayor rendimiento y la realización de actividades agrícolas con menor impacto medioambiental. Actualmente, se está impulsando la predicción de cosecha temprana combinando técnicas de inteligencia artificial con datos de satélite, meteorológicos y de cosechas anteriores, (Cubillas, *et al.*, 2022).
- **Transporte terrestre, marítimo y aéreo:** incluye la conducción autónoma de todo tipo de vehículos, drones y enjambres de drones, ferrocarril, gestión del tráfico, control de flotas, aproximaciones a puertos y canales de embarcaciones deportivas, autopistas marítimas, pesca, acuicultura etc. Es importante mencionar los avances de la industria aeroespacial española en el desarrollo de nuevas tecnologías para vehículos aéreos no tripulados, destacando de forma especial el Centro Avanzado de TECnologías Aeroespaciales (CATEC), en Sevilla.

- **Clima, medioambiente y biodiversidad:** aquí se pueden incluir todo lo relacionado con los cinco retos globales mencionados anteriormente: predicción de fenómenos meteorológicos extremos (Campuzano, *et al.*, 2023; Prikryl y Rušin, 2023; Martire, *et al.*, 2023; Barindelli, *et al.*, 2018; Priego, *et al.*, 2016); estudios de sequía (Retegui, *et al.*, 2023; Zhao, *et al.*, 2020); sistemas de alerta temprana para la predicción de terremotos, tsunamis y erupciones volcánicas (Pulinets, *et al.*, 2021; Chen, *et al.*, 2020); estudios del nivel medio del mar (Qiu y Jin, 2020; Tabibi, *et al.*, 2020). También se puede añadir la monitorización de fauna salvaje con dispositivos GNSS para ayudar a conocer los hábitos de comportamiento animal (Garrido, *et al.*, 2023) o la señalización de senderos en parques naturales.
- **Gestión de emergencia y ayuda humanitaria:** Es cada vez más frecuente el uso de drones guiados por GNSS en tareas de salvamento o para la delimitación del perímetro en un incendio forestal.
- **Energía y materias primas:** La industria eléctrica, por ejemplo, utiliza el sistema GNSS para sincronizar sus estaciones y poder localizar posibles fallos en el servicio eléctrico. La localización del fallo se realiza por triangulación. Son también de utilidad para las energías renovables. Por ejemplo, se utilizan para determinar la posición de los molinos de viento, o para realizar los mapas solarimétricos en centrales solares.
- **Infraestructura:** los sistemas GNSS se usan en la proyección, ejecución, mantenimiento y auscultación de estructuras como puentes, viaductos, presas, edificios etc., (Reguzzoni, *et al.*, 2022; Barzaghi, *et al.*, 2019). Mención especial merece en este apartado la Ciudad de México que al estar construida sobre una laguna, está sometida a una importante subsidencia que puede superar los 30 cm/año. Estos desplazamientos verticales causan grandes problemas en sus obras de infraestructura civil que en palabras de los mexicanos “están chuecas”. En la figura 11 se puede ver, como milagrosamente, se mantiene en pie la Basílica de la Virgen de Guadalupe. Hasta hace pocos años, se estudiaba este fenómeno mediante campañas periódicas de nivelación. Actualmente, además de la nivelación, se utilizan técnicas de observación de la Tierra para la monitorización de la subsidencia. En concreto, la Universidad Autónoma de México está proyectando una red de estaciones GNSS con el objetivo del seguimiento y cuantificación de los desplazamientos verticales, (Maubant, *et al.*, 2022).



Figura 11. Basílica de Guadalupe en Ciudad de México.

- **Finanzas y seguros:** Por ejemplo, las imágenes por satélite juegan un papel importante en los seguros agrícolas y la localización de coches robados. Los sistemas GNSS también ofrecen información en tiempo real sobre nuestro modo de conducir: velocidad media y vías más frecuentadas generando una valiosa información a las aseguradoras.
- **Espacio:** la observación de la Tierra se fundamenta en el conocimiento preciso de las posiciones de los satélites involucrados. Los satélites GNSS se usan para calcular las posiciones de otros satélites, (Hofmann-Wellenhof, 2012).
- **Desarrollo urbano y patrimonio cultural:** donde tienen especial importancia los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la visualización y gestión de los datos.
- **Soluciones de consumo, turismo y bienestar:** Corresponden a las Apps implementadas en teléfonos inteligentes y tabletas que con frecuencia utilizan cartografía de base. También hay que incluir aquí los relojes con dispositivos GNSS.

Este último segmento es el que domina el mercado GNSS. En 1999, la empresa Benetton lanzó el primer teléfono con dispositivo GPS integrado. Hoy en día, este tipo de teléfono representa casi el 90% de los dispositivos vendidos tal y como puede

verse en la figura 12, (EUSPA EO and GNSS Market Report, 2023). En un principio, la ubicación obtenida con estos teléfonos alcanzaba precisiones de pocos metros. Desde 1999 a 2016, las observaciones GNSS (código, fase y Doppler) no estaban disponibles para los desarrolladores, ya que los datos estaban protegidos por los fabricantes de chips. La situación cambió en Mayo de 2016, cuando **Google anunció que las mediciones GNSS estarían disponibles en el sistema operativo Android 7.0** (European GNSS Agency, 2017). Esto supuso una revolución en la toma de datos de geolocalización y sus posible usos y servicios. En Mayo de 2018, la empresa Xiaomi lanzó el primer teléfono inteligente equipado con el chip BCM47755 capaz de recibir observaciones multifrecuencia y multiconstelación (GPS, Galileo, BeiDou y GLONASS), (Broadcom, 2021). Otros fabricantes como Huawei, Samsung y OnePlus continuaron la misma senda. Como consecuencia, se han creado nuevas oportunidades para que desarrolladores e investigadores puedan programar nuevos algoritmos que mejoren la determinación de la posición y del tiempo estimados con un teléfono. Como resultado de las nuevas APPs disponibles en teléfonos con sistema operativo Android 7.0 y posteriores, estos teléfonos correctamente utilizados pueden alcanzar precisiones de nivel decimétrico, lo que los convierte en dispositivos de bajo coste que pueden ser usados en trabajos de catastro, SIG, guiado y seguimiento de vehículos, redes sociales, turismo, tareas de rescate y emergencia, control del tráfico, deporte, ciudades inteligentes, realidad aumentada, internet de las cosas, conexión de redes energéticas etc. (Mahato, *et al.*, 2023; Zangenehnejad y Gao, 2021). En todos estos casos, el uso de teléfonos GNSS puede abaratar sustancialmente los costes.

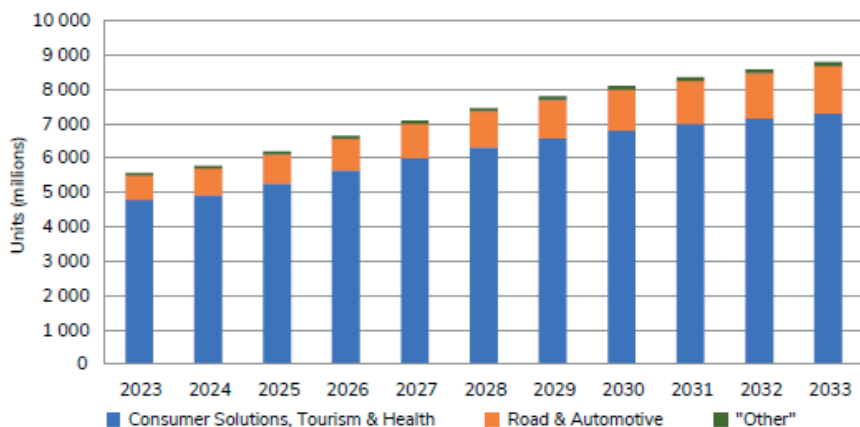


Figura 12. Tendencias del mercado GNSS.

También pueden ser usados para algunos trabajos de Cartografía y Topografía y actualmente se está investigando mucho en su utilización para el control de la “salud” de estructuras civiles. Normalmente se utilizan equipos GNSS geodésicos pero su coste es elevado. Por ello, se buscan métodos de evaluación de la integridad de estructuras más económicos y fiables. Los teléfonos inteligentes dotados de chips GNSS no han sido diseñados para ello, pero recientemente Vázquez Ontiveros ha defendido en su tesis de doctorado que algunos teléfonos con chip GNSS multifrecuencia y multiconstelación que permiten la descarga de sus observaciones, en este caso concreto el modelo Xiaomi Mi 8, pueden ser usados con este fin (Vázquez-Ontiveros, *et al.*, 2023). Este modelo de teléfono, con una técnica de observación especial, junto con un procesamiento meticuloso y preciso de los datos ha sido evaluado en el puente atirantado de El Carrizo (figura 13). Los resultados indican que este modelo de teléfono ha permitido detectar desplazamientos horizontales de ± 8 mm frente a los ± 5 mm detectados por un receptor geodésico. En la componente vertical, la diferencia entre los desplazamientos verticales detectados por ambos equipos fue inferior a 1 cm.



Figura 13. Teléfono Xiaomi Mi8 tomando datos en un puente atirantado.

Todo lo visto hasta ahora está relacionado únicamente con los satélites de posicionamiento y navegación y observación de la Tierra (figura 14) pero no podemos olvidarnos del auge de los **nanosatélites**. Mientras un satélite GPS pesa aproximadamente 800 kg, viaja a cuatro km al segundo y tiene una vida media de siete años y medio, un nanosatélite es un pequeño dispositivo espacial diseñado para orbitar a alturas reducidas, de entre 400 y 1.000 km de altitud. Pesa de 1 a 10 kg y tiene una vida media de dos a cuatro años. Pueden usarse para la observación de la Tierra, las telecomunicaciones, meteorología etc. Con independencia de la oportunidad de negocio que se presenta entorno a la fabricación y servicios de estos satélites de bajo coste, los españoles podemos presumir de tener ya en órbita nanosatélites autónomos, destacando el catalán Menut, el vasco Urdaneta y el andaluz Platero. Los dos primeros con fines medioambientales y el último dedicado a la agricultura de precisión.

En el panorama de la industria espacial ya no están únicamente agencias estatales como por ejemplo la NASA (National Aeronautics and Space Administration), la ESA (European Space Agency) o la JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), ahora estas agencias se apoyan en empresas privadas como SpaceX para minimizar el presupuesto de sus misiones y agilizar su puesta en marcha.

Está previsto el lanzamiento de aproximadamente 20.000 nuevos satélites durante la próxima década. Con todos estos satélites girando a nuestro alrededor y velando por nuestro bienestar, parece previsible pensar que una nueva oportunidad de negocio será el diseño y gestión de la limpieza del espacio. Cuando termina el período de actividad de los satélites modernos, aquellos que están en órbitas altas son enviados a una órbita cementerio y los que están en órbitas bajas descienden a la atmósfera donde se desintegran, pudiendo quedar millones de fragmentos que, junto con otros desechos espaciales, siguen orbitando alrededor de la Tierra a grandes velocidades generando riesgo de colisión. Estas colisiones pueden crear cientos de nuevos desechos o chatarra espacial que podrían dañar un satélite activo o incluso destruirlo. Por ejemplo, el satélite ERS-2 fue lanzado en 1995 y durante su período de actividad realizó observaciones medioambientales. Algunos restos suyos han caído a la Tierra el pasado 21 de febrero de forma descontrolada después de estar inactivo desde 2011. Según la Agencia Espacial Europea, el satélite se desintegró en la atmósfera y algunos fragmentos cayeron “probablemente” en el océano Pacífico Norte.



Figura 14. Ejemplo de diferentes misiones satelitales.

Con el objetivo de vigilar y controlar lo que ocurre en el espacio, la UE ha creado el **Servicio de Vigilancia y Seguimiento Espacial (SST)** que a través de una red de estaciones terrestres rastrea los objetos que orbitan alrededor de la Tierra y genera un catálogo de los mismos. España colabora en la catalogación de la basura espacial a través del Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) en San Fernando. EL ROA dispone de un observatorio de telemetría láser (SLR) que en la actualidad se dedica principalmente a la identificación y catalogación de basura espacial (figura 15). La línea verde que vemos es el rayo láser que debe interceptar los satélites artificiales para verificar su posición y permitir de este modo su seguimiento. De esta forma, se trata de evitar que los objetos viajen de forma descontrolada en el espacio.

Hace unos días cuando iba en el metro, pasé por la estación de Guzmán el Bueno donde unos carteles conmemoran el 150 aniversario de la fundación del Instituto Geográfico Nacional por parte del General Ibáñez de Ibero. En ellos se puede leer “observamos y medimos la Tierra”. En España, hasta hace poco tiempo observaban y medían la Tierra los militares del Servicio Geográfico del Ejército (hoy Centro Geográfico del Ejército de Tierra), los ingenieros geógrafos del Instituto Geográfico y Estadístico fundado por el General Ibáñez de Ibero (actualmente Instituto Geográfico Nacional), los “sabios” de la Armada y algún otro organismo público. En la actualidad, **la democratización de los datos y en particular de los datos de satélites**, que permite acceder a ellos de forma libre y gratuita, abre nuevas oportunidades en el sector empresarial.

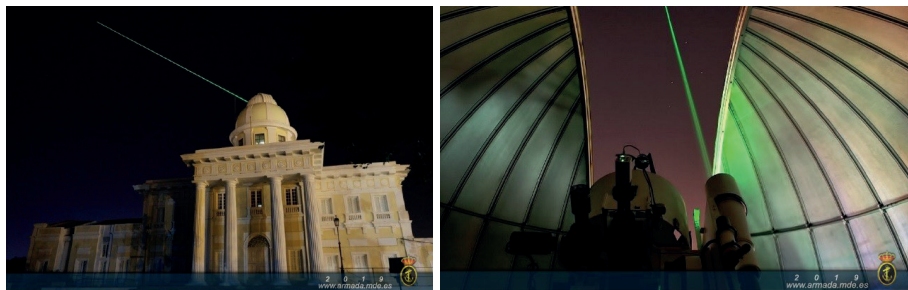


Figura 15. Observatorio de telemetría láser del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando.

A continuación y a modo de ejemplo, nombro algunas pequeñas empresas en las que trabajan antiguos alumnos míos y cuya actividad está relacionada con las aplicaciones de los satélites:

- **GReD** (Geomatics Research & Development srl). Nace como startup del Instituto Politécnico de Milán, liderada por el profesor Sansò que fue presidente de la Asociación Internacional de Geodesia de 1999 a 2003. Aquí se “acurrucaron” algunos de sus antiguos doctorandos con formación en Informática y CC Ambientales. Su actividad se centra en el estudio, diseño y desarrollo de soluciones innovadoras y altamente personalizadas basadas en datos de satélites. Por ejemplo, desarrollo de software para procesamiento de datos GNSS, servicios de prospección a partir de datos gravimétricos, monitorización medioambiental y meteorológica.
- **Georbital**. Es una empresa de Ingeniería y topografía, con sedes en Madrid, Córdoba y Málaga con actuación en el ámbito nacional. Su actividad se centra en la topografía y en especial en el control de presas. Está formada por ingenieros con amplios conocimientos en Topografía, Escaneo Láser 3D, Geodesia Espacial y Geomática.
- **4DGeoservices**. Es una empresa que nace de la experiencia de profesionales relacionados con la captura, análisis y gestión de información geográfica. Su actividad se centra en proporcionar soluciones para la gestión inteligente del territorio, del patrimonio y de edificios.
- **Apps To Enjoy S.L.** Se dedica al desarrollo de aplicaciones y programas informáticos para dispositivos móviles, fundamentalmente en el ámbito de la construcción.
- **KeplerKoord S.L.** Es una empresa dedicada a las actividades de consultoría relacionadas con el análisis de datos e imágenes con aplicaciones en agricultura; la creación, desarrollo y personalización de programas informáticos para la generación de servicios GNSS y de prospección.
- **Microsensory**. Nace en 2003, como empresa enfocada en el diseño, fabricación y desarrollo de dispositivos electrónicos de telecomunicaciones. Centra su actividad en el desarrollo de dispositivos para el seguimiento de aves migratorias y animales salvajes en todos los continentes del mundo.

Llegamos al final. He aprendido cosas nuevas preparando esta ponencia, por lo que agradezco al decano que pensara en mí para el día de hoy. Espero haber dado a conocer un poquito el mundo de los satélites y sus múltiples aplicaciones y sobre todo, confío en no haber fustigado en exceso a la audiencia. Si a pesar de mis buenas intenciones, no hubiese conseguido mi propósito, pido disculpas.

Bibliografía

BARINDELLI, S.; REALINI, E.; VENUTI, G.; FERMI, A.; GATTI, A. (2018). Detection of water vapor time variations associated with heavy rain in northern Italy by geodetic and low-cost GNSS receivers. *Earth, Planets and Space*, 70: 28.

BARZAGHI, R.; REGUZZONI, M.; DE GAETANI, C. I.; CALDERA, S.; ROSSI, L. (2019). Cultural heritage monitoring by low-cost GNSS receivers: A feasibility study for San Gaudenzio's Cupola, Novara. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XLII-2/W11: 209-216.

BROADCOM (2021). Broadcom bcm17755 gnss chip. <https://www.broadcom.com/products/wireless/gnss-gps-socs/bcm47755>.

BRUNINI, C. (Marzo 2021). El GGRF y el desarrollo sostenible. Conferencia impartida dentro del Máster Universitario de Ingeniería Geodésica y Geofísica aplicada. Universidad de Jaén.

CAMPUZANO, S. A.; DELGADO-GÓMEZ, F.; MIGOYA-ORUÉ, Y.; RODRÍGUEZ-CADEROT, G.; HERRAIZ-SARACHAGA, M.; RADICELLA, S. M. (2023). Study of Ionosphere Irregularities over the Iberian Peninsula during two Moderate Geomagnetic Storms Using GNSS and Ionosonde Observations. *Atmosphere*, 14: 233.

CHEN, K.; LIU, Z.; SONG, Y.T. (2020) Automated GNSS and teleseismic earthquake inversion (autoquake inversion) for Tsunami early warning: retrospective and real-time results. *Pure Appl Geophys* 177(3): 1403-1423.

CUBILLAS, J. J.; RAMOS, M. I.; JURADO, J. M.; FEITO, F. R. (2022). A Machine Learning Model for Early Prediction of Crop Yield, Nested in a Web Application in the Cloud: A Case Study in an Olive Grove in Southern Spain. *Agriculture*, 12: 1345.

ERWIN, S. (2024). The race to back up vulnerable GPS. SpaceNews.

EUROPEAN GNSS AGENCY. "White paper-Using GNSS RAW Measurements on Android Devices," European Global Navigation Satellite System Agency, (2017). (https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss_raw_measurement_web_0.pdf, accedido el 19 de Marzo de 2024).

EUSPA EO AND GNSS MARKET REPORT (2023). (euspa.europa.eu/sites/default/files/euspa_market_report_2024.pdf, accedido el 19 de Marzo de 2024).

GARATE, J.; MARTIN-DAVILA, J.; KHAZARADZE, G.; ECHEVERRIA, A.; ASENSIO, E.; GIL, A. J.; DE LACY, M. C.; ARMENTEROS, J. A.; RUIZ, A. M.; GALLASTEGUI, J.; ALVAREZ-LOBATO, F.; AYALA, C.; RODRÍGUEZ-CADEROT, G.; GALINDO-ZALDÍVAR, J.; RIMI, A.; HARNAFI, M. (2015). Topo-Iberia project: CGPS crustal velocity field in the Iberian Peninsula and Morocco. *GPS Solutions*, Vol. 19: 289-295.

GARRIDO CARRETERO, M. S.; AZORIT, C.; DE LACYPÉREZ DE LOS COBOS, M. C.; VALDERRAMAZAFRA, J. M.; CARRASCO, R.; and GILCRUZ, A. J. (2023). Improving the precision and accuracy of wildlife monitoring with multiconstellation, multifrequency GNSS collars. *Journal of Wildlife Management* e22378.

GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, M. (2013). Jorge Juan y Santacilia, 1713-2013. *Revista General de Marina*, 365: 253-272.

GUILLÉN, J. (1973). *Los tenientes de navío Jorge Juan Santacilia y Antonio de Ulloa y de la Torre-Guiral y la medición del Meridiano*. Caja de Ahorros de Novelda. Madrid.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H. y COLLINS, J. (2012). *Global positioning system: theory and practice*. Springer-Verlag.

MAHATO, S.; DUTTA, D.; ROY, M.; SANTRA, A.; DAN, S.; and BOSE, A. (11 Jan. 2023). Common Android Smartphones and Apps for Cost-Efficient GNSS Data Collection: An Overview, *IETE Journal of Research*.

MARTIRE, L. *et al.* (2023). The GUARDIAN system-a GNSS upper atmospheric real-time disaster information and alert network. *GPS Solutions*, 27: 32.

MAUBANT, L.; RADIGUET, M.; PATHIER, E.; DOIN, M.-P.; COTTE, N.; KAZACHKINA, E.; KOSTOGLODOV, V. (2022). Interseismic coupling along the Mexican subduction zone seen by InSAR and GNSS, *Earth and Planetary Science Letters*, 586: 117534, ISSN 0012-821X.

PRIEGO, J.; JONES, J.; PORRES, M.; SECO, A. (2016). Monitoring water vapour with GNSS during a heavy rainfall event in the Spanish Mediterranean area. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8: 1-13.

PRIKRYL, P.; and RUŠIN, V. (2023), Occurrence of heavy precipitation influenced by solar wind high-speed streams through vertical atmospheric coupling. *Front. Astron. Space Sci.* 10: 1196231.

PULINETS, S.; KRANKOWSKI, A.; HERNANDEZ-PAJARES, M.; MARRA, S.; CHERNIAK, I.; ZAKHARENKOVA, I.; ROTHKAEHL, H.; KOTULAK, K.; DAVIDENKO, D.; BLASZ-KIEWICZ, L.; FRON, A.; FLISEK, P.; RIGO, A. G.; and BUDNIKOV, P. (2021) Ionosphere Sounding for Pre-seismic Anomalies Identification (INSPIRE): Results of the Project and Perspectives for the Short-Term Earthquake Forecast. *Front. Earth Sci.*

QIU, H.; JIN, S. (2020). Global Mean Sea Surface Height Estimated from Spaceborne Cyclone-GNSS Reflectometry. *Remote Sens.* 12, 356.

REGUZZONI, M.; ROSSI, L.; GAETANI, C.; CALDERA, S.; and BARZAGHI, R. (2022). GNSS-Based Dam Monitoring: The Application of a Statistical Approach for Time Series Analysis to a Case Study. *Applied Sciences.*

RETEGUI SCHIETTEKATTE, L.; SELMIRA GARRIDO, M.; and CLARA DE LACY, M. (2023). Use of GNSS and ERA5 precipitable water vapor based standardized precipitation conversion index for drought monitoring in the Mediterranean coast: A rst case study in Southern Spain, *Advances in Space Research.*

TABIBI, S.; GEREMIA-NIEVINSKI, E.; FRANCIS, O.; VAN DAM, T. (2020) Tidal analysis of GNSS reflectometry applied for coastal sea level sensing in Antarctica and Greenland, *Remote Sensing of Environment*, 248: 111959, ISSN 0034-4257.

SÁNCHEZ, L. (2020). Contribución de la Geodesia a la observación y modelado del Sistema Tierra. Conferencia impartida dentro del Máster Universitario de Ingeniería Geodésica y Geofísica aplicada. Marzo 2020. Universidad de Jaén.

VAZQUEZ-ONTIVEROS, J. R., MARTINEZ-FELIX, C. A., MELGAREJO-MORALES, A., *et al.* (2023). Assessing the quality of raw GNSS observations and 3D positioning performance using the Xiaomi Mi 8 dual-frequency smartphone in Northwest Mexico. *Earth Sci Inform* 17, 21-35.

VERDÚ VÁZQUEZ, A. (2007). Enlaces geodésicos intercontinentales. Investigación sobre los enlaces occidentales Europa-África. Universidad Politécnica de Madrid. Tesis doctoral.

ZANGENEHNEJAD, E; and GAO, Y. (2021). GNSS smartphones positioning: advances, challenges, opportunities, and future perspectives, *Satellite Navigation*, 2(1):1-23

ZHAO, Q., *et al.* (2020). A Drought Monitoring Method Based on Precipitable Water Vapor and Precipitation. *Journal of Climate*, 33, 10727-10741.

DE LACY PÉREZ DE LOS COBOS, María Clara. Catedrática del área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. En septiembre de 2022 se incorporó al Departamento de Matemáticas y Ciencia de Datos de la Universidad CEU San Pablo. Es doctora en CC. Matemáticas por la Universidad Complutense de Madrid. Fue contratada como investigadora postdoctoral en el Instituto Politécnico de Milán de 2001 a 2003. Se incorporó a la Universidad de Jaén con un contrato de retorno de investigadores en 2004 y fue allí donde obtuvo su cátedra en 2020. Tiene reconocidos cuatro periodos de investigación y cinco periodos de docencia. Ha sido profesora visitante en el Politécnico de Milán, colaborando en la docencia de la asignatura Posicionamiento y Control, en los años 2015, 2016 y 2017. Ha sido coordinadora del Máster en Ingeniería Geodésica y Geofísica Aplicada de la Universidad de Jaén y responsable de la Red Iberoamericana de Ingeniería Geodésica. Su investigación se centra en los sistemas GNSS y sus aplicaciones. Es también reservista voluntaria con destino en el Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando.