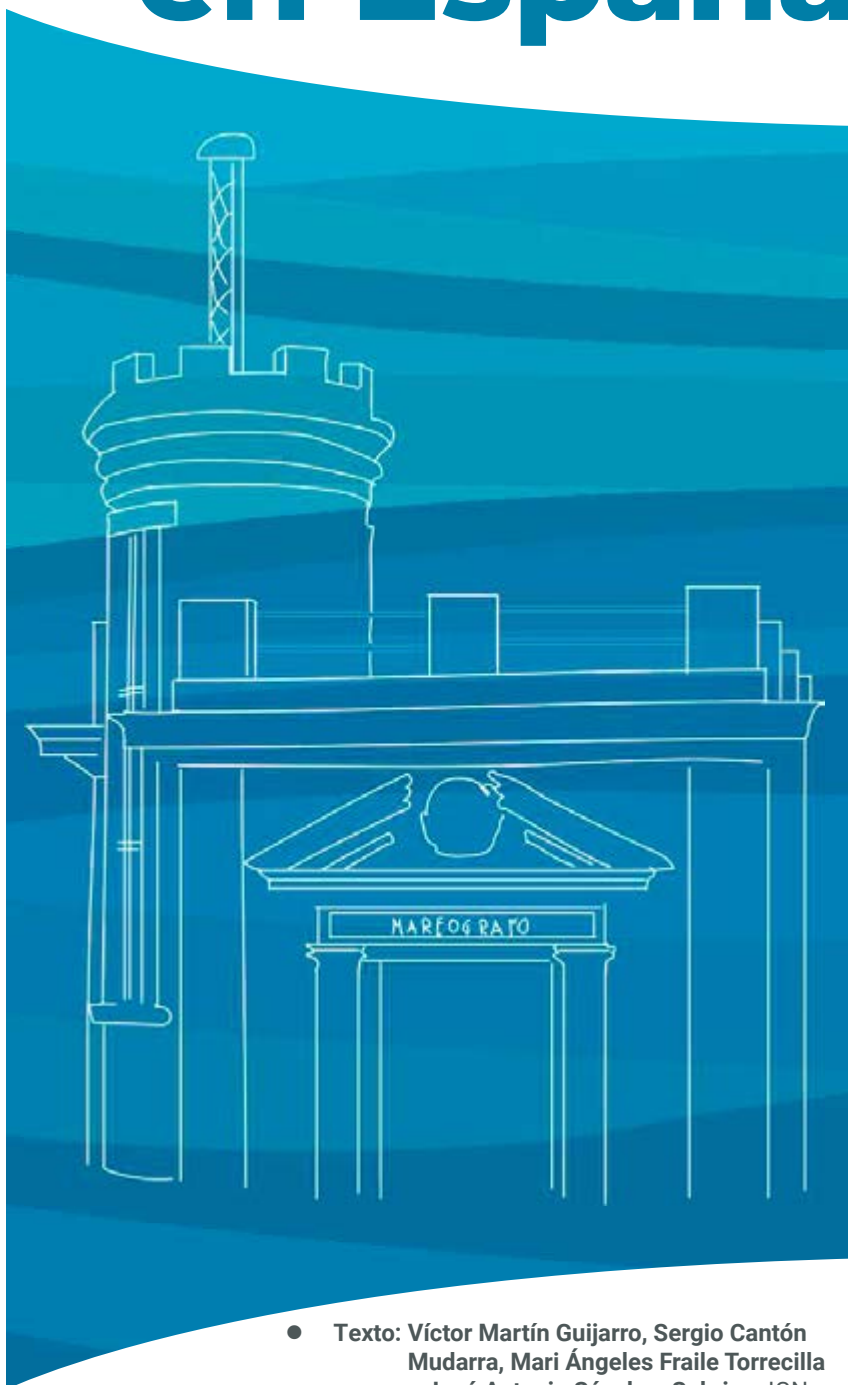


150 años del origen de altitudes en España



Hace 150 años, en 1874, el Instituto Geográfico Nacional recién creado, estableció el primer sistema oficial de altitudes tomando como referencia el nivel medio del mar Mediterráneo en Alicante. Esta decisión marcó un hito fundamental en el desarrollo de la cartografía y geodesia del país, permitiendo la creación de un sistema de altitudes unificado que facilitó las mediciones. A raíz de ese hito se pudo comenzar la titánica misión de elaborar el Mapa Topográfico Nacional que el país necesitaba para comprender la geografía y ejecutar la planificación y el desarrollo de infraestructuras con una cartografía homogénea y precisa.

- Texto: Víctor Martín Guijarro, Sergio Cantón Mudarra, Mari Ángeles Fraile Torrecilla y José Antonio Sánchez Sobrino; IGN

La creación del Instituto Geográfico y el proyecto del Mapa Topográfico Nacional

El 12 de septiembre de 1870 se creó, dentro del entonces Ministerio de Fomento, la Dirección General del Instituto Geográfico, con competencias en geodesia, cartografía, topografía, catastro y pesas y medidas. Esta institución fue presidida desde sus inicios por su fundador, el general Carlos Ibáñez de Ibero.

El contexto histórico de España en esa época no podía ser más turbulento, con numerosos gobiernos provisionales después del exilio de Isabel II como consecuencia de la revolución de 1868, el asesinato de Prim, el comienzo del efímero reinado de Amadeo de Saboya y una crisis económica profunda. A pesar de todo, el denominado "sexenio democrático" (1868-1874) trajo también consigo un anhelo de progreso científico y, especialmente, un desarrollo de las infraestructuras en un país claramente atrasado en este aspecto. En este periodo, los sectores clave de desarrollo fueron el ferrocarril, las redes viarias y las mejoras en la infraestructura urbana y portuaria. La necesidad de una cartografía nacional uniforme y detallada para el desarrollo y planificación de las infraestructuras era perentoria.

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) tuvo, por tanto, como una de sus primeras y principales tareas, la elaboración de una serie cartográfica continua para todo el país: el Mapa Topográfico Nacional, a escala 1:50 000. Para la viabilidad de este vasto proyecto era necesario la resolución de una serie de condicionantes geodésicos y matemáticos previos que debían sentar la base para la elaboración posterior de la cartografía.

En primera instancia, la cartografía necesitaba de un sistema de coordenadas de referencia oficial que permitiese relacionar puntos y localizaciones sobre el terreno con sus representaciones a escala sobre la cartografía. Esta tarea se dividió en dos claramente diferenciadas. Por un lado, se definió el conocido como Datum Madrid o Madrid 1870, un sistema de coordenadas en dos dimensiones con origen en el Real Observatorio de Madrid que permitía la localización de puntos en coordenadas latitud y longitud, a partir de una red geodésica que ya llevaba unos años en proceso de diseño y observación por todo el territorio nacional.

Otra cuestión eran las altitudes, que necesitaban la definición de un sistema vertical y una red de nivelación para diseminar este marco de referencia por todo el país y poder disponer de referencias altimétricas para dar la tercera coordenada a la cartografía. En paralelo a la ingente tarea de la construcción y observación de la red geodésica, en el mismo año de la creación del Instituto Geográfico, 1870, ya se empezó a planificar la definición de este necesario origen de altitudes.

La elección de Alicante

El sistema vertical que debía referenciar las altitudes de España necesitaba, en primer lugar, de un punto, denominado origen o *datum*, a partir del cual se fuesen relacionando, mediante nivelaciones topográficas de precisión, el resto de altitudes del país mediante una red de nivelación. Para calcular y establecer esa "cota cero", había que encontrar un punto de la costa peninsular española desde el cual medir el nivel del mar durante un tiempo suficiente para obtener un registro fiable y establecer un promedio.

Muchas veces se ha planteado la pregunta, tan recurrente como interesante en los círculos geodésicos y geográficos nacionales, del porqué la elección de Alicante como punto de origen de las altitudes. En 1870, Alicante tenía un puerto moderno y recién acabado de construir; poseía un muelle y un contramuelle que cerraban el puerto y lo protegían de las inclemencias del tiempo y de las corrientes de mar abierto; y la ciudad contaba también con una novísima línea de ferrocarril Madrid-Alicante. Se trataba de una infraestructura estable por la que se podía realizar, de mejor forma que en las carreteras de la época, los trabajos de nivelación que enlazarían en el futuro la capital alicantina con la meseta y la capital de España, además de facilitar la logística y el desplazamiento del personal entre las dos ciudades, en una época donde todavía no existían los automóviles.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que, en los trabajos de nivelación, por la mera aplicación de la ley de propagación de errores, que la precisión empeora cuanto mayor es la distancia al origen de altitudes que se escoja. En este sentido, Alicante presentaba una localización relativamente equidistante del resto del territorio peninsular, estando localizada en una posición central de la costa mediterránea.

Además, y debido a los rudimentarios métodos que se usaban, era mucho más sencillo, tanto para la toma de datos como para los posteriores cálculos, elegir una zona donde las amplitudes de marea, es decir, la diferencia de altura entre la marea alta o pleamar y la marea baja o bajamar fueran lo más pequeñas posibles. Es el caso del Levante peninsular, que presenta las menores amplitudes de marea de toda España, del orden de entre 20



Señal NP1 en el primer escalón del Ayuntamiento de Alicante.

y 50 centímetros, mucho menores que otros puntos de la costa como el Atlántico andaluz, o el Cantábrico, donde las amplitudes pueden llegar a los 3-5 metros.

Por último, se buscaba un punto costero donde la climatología fuera relativamente estable, que facilitase la toma de datos diaria de forma ininterrumpida y cuyas variaciones de presión fueran también mínimas.

En definitiva, este cúmulo de factores decantó la elección de Alicante como emplazamiento en el que medir el futuro nivel medio del mar, estableciéndose la referencia altimétrica de la España peninsular. En el caso de las islas, Ceuta y Melilla es necesario aclarar que tienen su origen de altitudes local, a partir de mediciones en cada isla.

El cálculo de la cota cero

Para la determinación de un nivel medio del mar en el puerto de Alicante se colocó, en las escaleras ubicadas en el Muelle de Levante, una denominada “regla de mareas” para leer directamente sobre ella el nivel del mar en diferentes horarios. Así, desde el 1 de julio de 1870 hasta el 28 de marzo de 1874, empleados del Instituto Geográfico se desplazaban al puerto cuatro veces al día a horas fijas (9:00, 12:00, 15:00 y 18:00 horas) y anotaban la altura que en ese instante tenía el nivel del mar sobre la regla de mareas.

El libro donde constan los cuatro años de lecturas sistemáticas sin ningún periodo en blanco se encuentra en el Instituto Geográfico Nacional y, cabe destacar, como anécdota, una anotación de septiembre de 1873, coincidiendo con el bombardeo de la ciudad de Alicante en el marco de la Rebelión cantonal por el Cantón de Cartagena, que dice: “En este día último del bombardeo no se permitió la entrada en el muelle a persona alguna”. El celoso funcionario dejó constancia en el libro de que la

falta de lecturas ese día no fue por absentismo laboral.

Una vez finalizado el registro de datos, y con casi cuatro años de mediciones, se llevó a cabo el cálculo del promedio de marea, con el que se obtuvo el nivel medio del mar de Alicante. Posteriormente, se llevó a cabo una nivelación de precisión desde la regla de mareas a una señal ubicada en el primer escalón del vestíbulo del Ayuntamiento de Alicante. Se eligió el ayuntamiento por ser un lugar muy próximo al puerto, pero construido en terreno estable, no ganado al mar y fuera de la influencia del puerto y las actividades portuarias que pudieran causar una subsidencia o inestabilidad en la posición de la señal. Esta señal, denominada NP1, es, desde 1874 hasta la actualidad, el datum del sistema vertical para la España peninsular y su marco de referencia altimétrico. Desde entonces, el valor de altitud de 3,4095 metros de esta señal no se ha cambiado como datum altimétrico peninsular, pese al ligero aumento del nivel medio del mar actual.

La primera red de nivelación de España

Una vez establecido el origen de altitudes, había que materializar el sistema vertical por el territorio, de forma que abarcara toda su geografía y llegase a las principales ciudades y a la red geodésica que se estaba construyendo y observando en aquella época. Desde Alicante y su señal NP1 se fueron realizando trabajos de nivelación, tanto por carreteras como por ferrocarril, para dotar de altitudes conocidas a la mayor cantidad de lugares posibles, tales como ayuntamientos, palacios, iglesias, catedrales, estaciones de ferrocarril, puentes, etc.



Placa de altitud asociada a la red de nivelación.

La estructura básica de la red de nivelación quedó conformada por unas líneas principales, las primeras de las cuales fueron Alicante-Madrid y Madrid-Santander, que se fueron ampliando con otras líneas poco a poco a lo largo de cientos de kilómetros. Pese a las

limitaciones técnicas de la época, se considera que se consiguieron unas precisiones muy buenas, del orden de $3\sqrt{K}$ mm, siendo K la distancia en kilómetros, o lo que es lo mismo, una incertidumbre máxima de 3 centímetros en una línea de 100 kilómetros.



Lámina que ilustra la medición en la regla de mareas.

La técnica de medición no ha cambiado excesivamente desde entonces, aunque sí la instrumentación, y consistía en las lecturas mediante un nivel óptico de precisión ubicado en el punto medio de dos miras situadas, como máximo, a 20 metros, con lo que se obtenía el desnivel del tramo entre las miras. La repetición consecutiva de esta medición por un tramo o línea de nivelación permitía ir trasladando y calculando las altitudes de un punto a otro.

La materialización de la red se hacía mediante señales empotradas en elementos estables y duraderos a lo largo de las líneas de nivelación (ferrocarriles o carreteras). Por ejemplo, se trataba de poner señales empotradas en fachadas de edificios singulares como iglesias, catedrales, ayuntamientos o edificios históricos con garantía de permanencia en el tiempo y estabilidad. Actualmente aún quedan algunas señales de las originales en este tipo de edificios, a pesar de las sucesivas versiones de la red de nivelación que se han venido realizando en España a lo largo de estos 150 años.

Los mareógrafos de Alicante

Desde 1874, momento en el que se finaliza la medición de la regla de mareas, Alicante ha contado con mareógrafos del Instituto Geográfico Nacional, por lo que dicha ciudad tiene un registro ininterrumpido del registro del nivel del mar de más de 150 años. Un mareógrafo es una instalación permanente y fija para el registro del nivel del mar con algún instrumento especializado. Consiste en un edificio muy próximo a la línea de costa y generalmente en los puertos, que tiene un pozo conectado por una tubería o canalización con el mar, amortiguando así los

movimientos de frecuencias pequeñas. Los movimientos de ascenso o descenso del nivel del mar que se produzcan en el mar serán similares a los que se produzcan en el pozo, donde se instala la instrumentación de registro.

La existencia de mareógrafos en el Puerto de Alicante ha permitido desde entonces el necesario mantenimiento del datum altimétrico y la continuidad del estudio del nivel medio del mar. Los sucesivos mareógrafos del Puerto de Alicante han sido cuatro:

- Caseta Obras Públicas (1874-1911): edificio ubicado en el muelle de Levante, muy próximo a la regla de mareas y primer mareógrafo permanente en España.
- Pabellón de Prácticos (1914-1924): situado en el muelle de Levante, próximo a su cambio de alineación hacia el oeste, con una duración efímera.
- Alicante I o mareógrafo exterior (1925 - actualidad): ubicado en la escollera exterior del malecón de Levante y el que tiene una

serie de datos más larga, con 100 años de historia.

- Alicante II o mareógrafo de la bocana (1953 - actualidad): ubicado en la bocana del puerto.

Instrumentación de registro del nivel del mar

La instrumentación empleada desde 1874 hasta finales del siglo XX fue de registro gráfico. Generalmente los instrumentos consistían en un flotador en contacto con el mar. Los ascensos o descensos de la lámina de agua son transmitidos por el flotador a un mecanismo de registro gráfico, que va grabando el nivel del mar en un rollo de papel giratorio. Dicho rollo gira gracias a un mecanismo de relojería, para que en todo momento se registre sobre papel nuevo el nivel del mar. Estos sistemas requerían de una periódica calibración mecánica y puesta a punto de sus componentes para un correcto registro del nivel del mar.

Los rollos de papel resultado del registro del nivel del mar reciben el nombre de mareogramas, similares a un sismograma, por ejemplo, que registra el movimiento de terremotos. El Instituto Geográfico Nacional conserva desde 1874 un importante patrimonio en mareogramas, convirtiéndose en la serie histórica de registro del nivel del mar más importante de España por su longevidad y registro ininterrumpido. Muchas de estas series están publicadas, y otras en proceso de digitalización, dada su enorme complejidad y delicadeza.

Algunos de estos instrumentos son auténticas piezas de museo, como los famosos mareógrafos Adie, Reitz, Thomson o Mier, que el Instituto Geográfico Nacional tiene expuestos en museos y exposiciones.



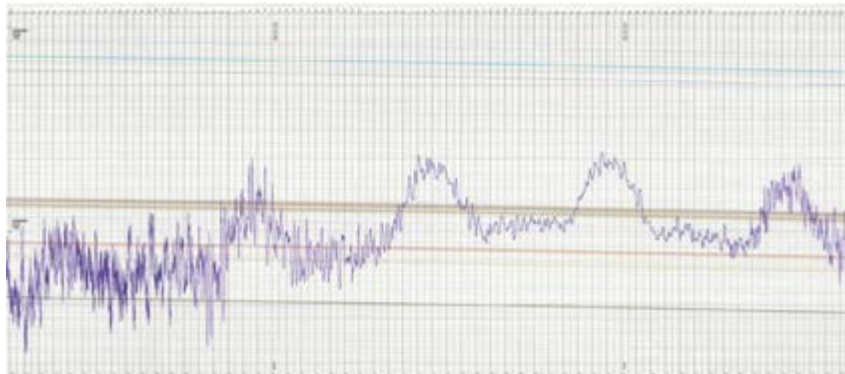
Edificio del mareógrafo Alicante II.

En la actualidad, los mareógrafos cuentan con instrumentos radar que miden el nivel del mar sin contacto con el medio, evitando el deterioro del material producido por el corrosivo ambiente marino. Un sistema radar emite pulsos en longitudes de onda del radar que rebotan al alcanzar la lámina de agua y vuelven a ser registrados por el sensor. El registro y almacenamiento de la información ya es digital y mediante las comunicaciones apropiadas se dispone del dato en tiempo real.

El papel del GNSS en la medida del nivel del mar

Actualmente, los sistemas de posicionamiento global (GNSS) aportan una información muy valiosa en la medida del nivel del mar y la monitorización de cualquier fenómeno dinámico terrestre. En el caso concreto de los mareógrafos, asentados sobre diques o zonas de puertos ganadas al mar, la subsidencia o asentamiento con el tiempo de las infraestructuras es un hecho constatable y que puede ser cuantificada mediante GNSS. Las series temporales de coordenadas que aportan las estaciones permanentes GNSS instaladas sobre mareógrafos permiten discriminar la subida real del nivel del mar medido por los mareógrafos respecto a una falsa subida del nivel del mar como consecuencia de una posible subsidencia de la estructura donde se instalan estos.

Así, en todos los mareógrafos del IGN, conjuntamente con los sensores ya citados, existe una estación permanente GNSS cuyos datos se procesan de forma diaria y permanente durante años para obtener estas series temporales en la componente altimétrica.



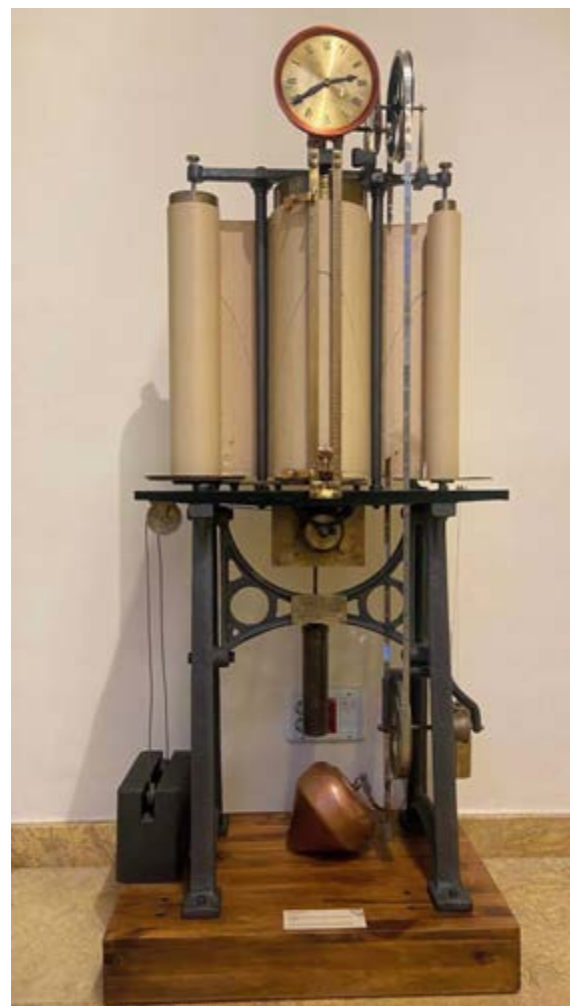
Mareograma de Alicante.

Pero no solo las estaciones GNSS contribuyen a esta necesaria monitorización de la altitud del mareógrafo, sino que también, a partir de una técnica denominada reflectometría GNSS (GNSS-R), el procesamiento de la señal reflejada en una superficie como la lámina de agua, permite medir también de forma continua el nivel del mar, comportándose de esta forma cada estación GNSS como otro sensor mareográfico. Las precisiones alcanzadas con esta técnica, aunque algo peores que con los propios dispositivos de medida de los mareógrafos, permiten tener un registro continuo del nivel del mar con una incertidumbre media del orden de 2 o 3 centímetros.

La estación permanente GNSS de Alicante fue precisamente la primera que el IGN instaló, en 1998, y que pasó a formar parte de una red europea fundamental de GNSS (EUREF) para la definición y mantenimiento del actual sistema de coordenadas europeo ETRS89. Por lo tanto, actualmente el mareógrafo de Alicante dispone también de una serie de coordenadas GNSS de más de 25 años.

Los mareógrafos del IGN en la actualidad y la medición de altitudes

Según el Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula



Instrumentación Thomson antigua.

el sistema geodésico de referencia oficial en España, en su artículo 4, se establece que:

1. Se tomará como referencia de altitudes los registros del nivel medio del mar en Alicante para



Participantes de los actos del "150 aniversario del origen de altitudes en España" en el Ayuntamiento de Alicante.

la Península y las referencias mareográficas locales para cada una de las islas. Los orígenes de las referencias altimétricas serán definidos y publicados por la Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.

2. *El sistema está materializado por las líneas de la Red de Nivelación de Alta Precisión.*

Por tanto, el IGN es el organismo competente en el cálculo y establecimiento de todos los orígenes de altitudes de los territorios nacionales, además de fijar y materializar el sistema de referencia vertical oficial mediante la red de nivelación REDNAP (Red Española de Nivelación de Alta Precisión). Actualmente el IGN dispone de una red de 10 mareógrafos, localizados en Alicante, Cartagena, Almería, La Coruña, la isla de Alborán, Fuerteventura y Tenerife.

Además de procesar los datos y calcular los promedios diarios, mensuales y anuales para cada

estación, los datos se publican en la página web del IGN y en otros servicios de instituciones internacionales del nivel del mar, como PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level) o GLOSS (Global Sea Level Observing System). También colabora con instituciones nacionales como Puertos del Estado y el Instituto Hidrográfico de la Marina. Hoy en día la contribución de los datos de los mareógrafos a estos organismos de cooperación internacional es especialmente importante para monitorizar de forma global la subida del nivel del mar causado por el cambio climático y el calentamiento global que producen un aumento del nivel medio del mar.

Los registros de los mareógrafos pueden evaluarse para determinar las mareas oceánicas y otros fenómenos a corto y medio plazo, incluidos los efectos de los cambios de presión atmosférica, las mareas tormentosas y la afluencia

del agua de deshielo. La promediación a lo largo de intervalos de tiempo prolongados revela las variaciones del nivel del agua a largo plazo. En comparación con las estimaciones del nivel del mar a partir de la altimetría por satélite, existen series temporales mucho más largas y precisas para mareógrafos, aunque restringidas a la costa. Para el siglo XX, se ha constatado una subida media global de 0,1 a 0,2 m/100 años, con una gran dispersión regional y local y variaciones decenales, o, aplicado a los últimos años, una subida del orden de 2-3 mm/año.

La actual Red de Nivelación de Alta Precisión de España (RED-NAP) está conformada por unas 30 600 señales y algo más de 23 000 kilómetros de líneas. Las señales de esta red sirven de referencias fundamentales para la altitud en todo el territorio peninsular e insular. El actual sistema de altitudes español requiere también del conocimiento de la gravedad y, por ello, este parámetro es medido en todas las señales de REDNAP mediante aparatos denominados gravímetros. La altitud es una magnitud no solo geométrica sino también física y, por ello, la medida de la gravedad se hace indispensable.

A pesar de los avances tecnológicos en las técnicas espaciales de medición geodésica, actualmente los mareógrafos y las redes de nivelación siguen siendo elementos fundamentales en la definición y el mantenimiento de los marcos de referencia en altitud.

Hoy, más que nunca, es necesario poner en valor el trabajo de aquellos ingenieros que nos precedieron en el Instituto Geográfico Nacional hace 150 años y acometieron la ingente tarea de definir un origen de altitudes que sigue vigente en la actualidad. ■



GOBIERNO
DE ESPAÑA

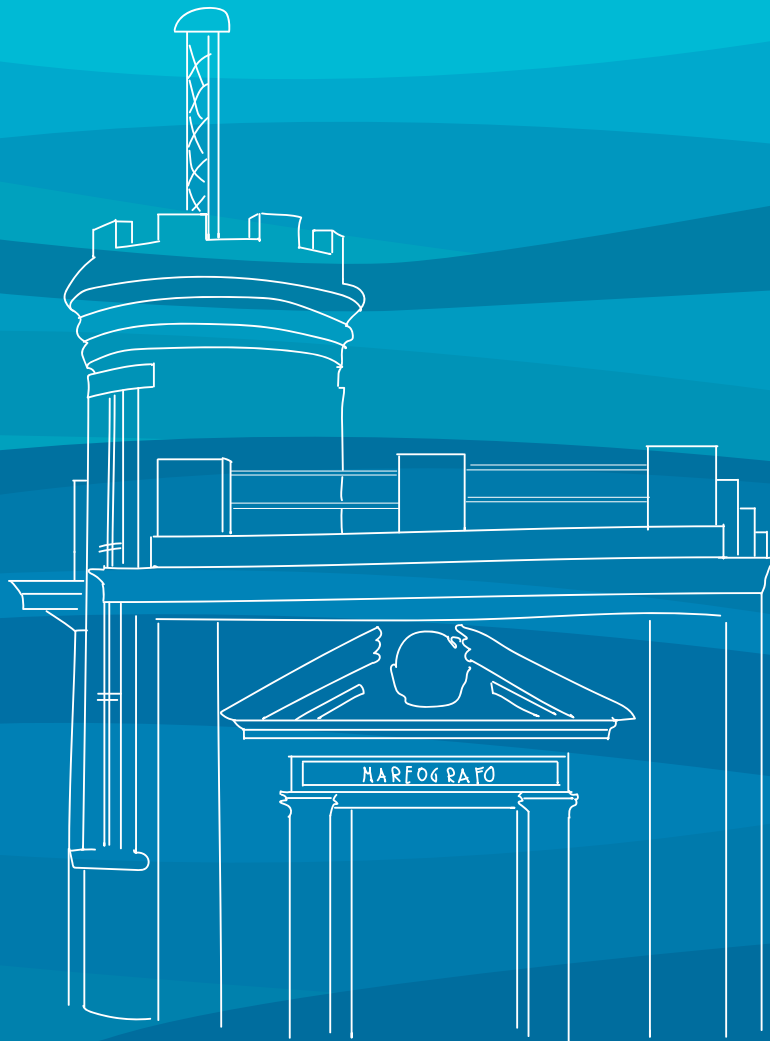
MINISTERIO
DE TRANSPORTES
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

INSTITUTO
GEOGRÁFICO
NACIONAL



150 años del origen de altitudes en España

www.ign.es



Alicante 1874 - 2024