REAL OBSERVATORIO
ASTRONÓMICO DE MADRID
CIENCIA, HISTORIA Y PATRIMONIO

OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA
INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL

REAL OBSERVATORIO
ASTRONÓMICO DE MADRID

CIENCIA, HISTORIA Y PATRIMONIO

OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE TRANSPORTES, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA
INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL

Título:
REAL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE MADRID. Ciencia, historia y patrimonio
Editado en octubre de 2023. Edición revisada en enero de 2024.

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
https://cpage.mpr.gob.es/

Publica:
© De esta edición, O. A. Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2023.

Autoría:
© Instituto Geográfico Nacional.
Dr. Miguel Querejeta Pérez (Observatorio Astronómico Nacional).

Diseño y maquetación:
Observatorio Astronómico Nacional, Instituto Geográfico Nacional.

Fotografía de portada: imagen infrarroja del campo profundo GOODS-South obtenida por el telescopio espacial James Webb, que muestra una infinidad de galaxias hasta la infancia del universo (crédito: NASA, ESA, CSA, B. Robertson, B. Johnson, S. Tacchella, M. Rieke, D. Eisenstein, A. Pagan). Superpuesta, imagen del edificio de Juan de Villanueva en el Real Observatorio de Madrid.

NIPO papel: 798-23-045-1
NIPO digital: 798-23-046-7
ISBN: 978-84-416-7647-3
Depósito legal: M-33457-2023
DOI: 10.7419/162.14.2023

Los derechos de la edición son del O. A. Centro Nacional de Información Geográfica como editorial.

Este Organismo agradece que la difusión electrónica masiva de la edición digital se realice a través de un enlace al apartado correspondiente de la página web oficial.

Impreso en los talleres del Instituto Geográfico Nacional.

Calle General Ibáñez de Ibero, 3
28003 - Madrid (España)
ign.es / cnig.es
consulta@cnig.es

ÍNDICE

Prólogo 7

INTRODUCCIÓN 16

EDIFICIO DE VILLANUEVA 26

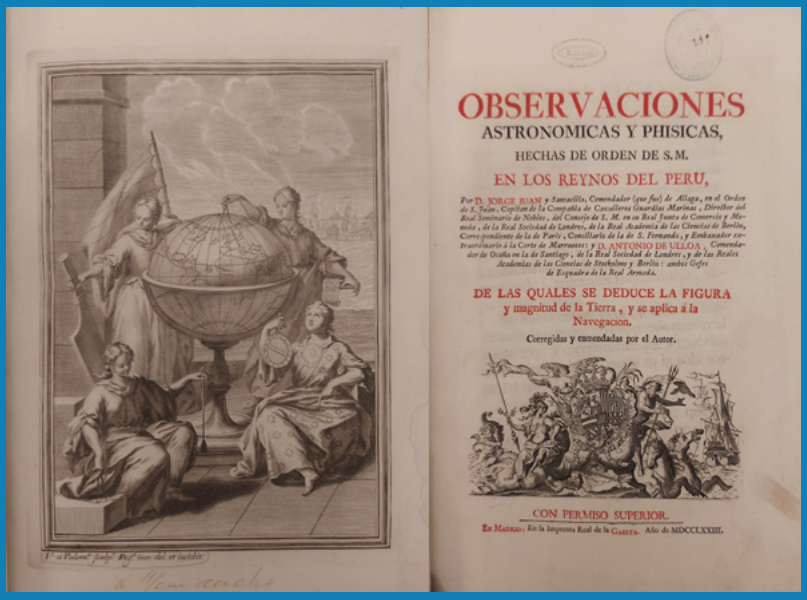
- Un observatorio ilustrado en el eje de las ciencias 29
- La rotonda central y el péndulo de Foucault 39
- Sala del círculo meridiano 47
- La biblioteca histórica del Observatorio 55

PABELLÓN DE HERSCHEL 60

SALA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL UNIVERSO 72

- Astronomía 75
- Geodesia y cartografía 79
- Geofísica y meteorología 95

EL REAL OBSERVATORIO DE MADRID HOY 104



OBSERVACIONES
ASTRONOMICAS Y PHISICAS,
HECHAS DE ORDEN DE S.M.
EN LOS REYNOS DEL PERU,
DE LAS QUALES SE DEDUCE LA FIGURA y magnitud de la Tierra, y se aplica á la Navegacion.
Corregidas y enmendadas por el Autor.
CON PERMISO SUPERIOR.

Portada de la obra *Observaciones astronómicas y físicas*, de Jorge Juan y Antonio de Ulloa, que se conserva en la Biblioteca del Observatorio.

Carlos III, retratado por Anton Raphael Mengs hacia 1765. Museo del Prado.

Prólogo

Observaciones, medidas, cálculos científicos y técnicos, creación de nuevas instituciones como jardines botánicos, laboratorios de química, fábricas de vidrio, colecciones de mineralogía y de zoología, observatorios astronómicos... son algunas de las muestras de lo que fue el Siglo de las Luces en España: un auténtico hervidero intelectual.

A pesar de todo, hemos de reconocer que el movimiento ilustrado no estuvo aquí tan bien orquestado como en otras naciones europeas donde contaron con un Hume, un Kant o un Voltaire llevando la batuta. Y es que, debido al agotamiento causado por las guerras y a los desesperados intentos por mantener el imperio, España había llegado a principios del siglo XVIII con una cultura científica muy a la zaga de las de otras potencias vecinas.

Es en este contexto que las élites, ya durante el reinado de los primeros Borbones, alimentaron un estado de opinión que reclamaba incrementar la cultura nacional científica y técnica. Pero, debido al contexto histórico, el papel que, en otros países, jugaron las academias científicas, aquí se repartió y diluyó entre grupos diversos, por ejemplo: los de los llamados "novatores", las tertulias y las Sociedades Económicas de Amigos del País, instituciones donde germinaron y se desarrollaron las ideas ilustradas, aunque, como decíamos, de manera mucho más atomizada y dispersa que en las naciones de nuestro entorno.

Además, con la llegada de los Borbones, se había iniciado una colaboración con Francia que pronto daría sus frutos, llevando a España a niveles comparables a los de otras naciones europeas. Uno de los proyectos estelares en los que se plasmó la colaboración borbónica franco-española fue la medida de un grado del meridiano terrestre que, con el fin de comprobar el achatamiento de la Tierra, fue llevada a cabo por Louis Godin y Charles-Marie de La Condamine cerca del ecuador, en territorio español. Siguiendo la sugerencia de Felipe V, los guardiamarinas Antonio de Ulloa y Jorge Juan participaron en la expedición y, no solo para servir de apoyo, sino que acabaron desempeñando un papel de altísima relevancia junto a los académicos franceses. Fruto de estos trabajos fue el memorable volumen *Observaciones astronómicas y físicas* publicado en Madrid en 1748.

La política de incrementar la cultura científica y de apertura hacia el extranjero, que había sido emprendida por Felipe V, sería mantenida por Fernando VI, Carlos III y Carlos IV, y no se interrumpiría hasta el estallido de la Guerra de la Independencia. Gracias a todo ello, España no fue, durante las Luces, la nación inculta y atrasada que algunos parecen estar empeñados en hacernos creer. Las personalidades de nuestros personajes ilustrados, de los marinos, astrónomos y cartógrafos españoles que vivieron en aquellos años nos asombran hoy por sus proezas y por el virtuosismo de sus trabajos.

Las instituciones creadas entonces, siguiendo esta política racional y aperturista, intentaban emular a los modelos europeos y fueron dotadas con cuantiosos medios materiales y de financiación. En esta línea de actuación, se crearon los dos observatorios astronómicos más importantes de la época, ambos siguiendo las sugerencias del ilustre marino Jorge Juan: el de San Fernando en Cádiz, en 1753, y el Real Observatorio Astronómico de Madrid en 1790.

Vista del Real Museo (hoy Museo del Prado), dibujada por Carlos de Vargas Machuca y litografiada por Vicente Camarón (hacia 1824).

Estanque del Buen Retiro y la Fábrica de "La China", hacia 1816. Temple sobre sarga. Museo de Historia de Madrid. Al fondo se aprecia el Observatorio Astronómico.

Fortificaciones francesas del Retiro construidas entre 1808 y 1813. Ministerio de Defensa.

A mi manera de ver, la creación de estos dos observatorios, modernos y de vocación europea, se encuentra entre los mayores legados que nos dejó Jorge Juan. Y es que, en la ciencia moderna, los observatorios son las plataformas privilegiadas desde las que se realizan las medidas y gran parte de la investigación observacional en materia de astronomía.

El Observatorio de San Fernando en Cádiz fue fundado en 1753, mientras el sabio español se encontraba dirigiendo la escuela de guardiamarinas, y fue dotado con los mejores instrumentos de la época. Años después, desde Cádiz, llegó el marino a Madrid en 1770 para dirigir y regenerar el Real Seminario de Nobles, una especie de universidad privada, elitista y muy prestigiosa, que había sido gestionada por los jesuitas hasta su expulsión, momento en el que había caído en decadencia.

Y es aquí, en Madrid, donde Jorge Juan desarrolla la idea de fundar un nuevo observatorio que responda al interés creciente por la astronomía que se estaba viviendo en el país. Si el de Cádiz estaba consagrado a la aplicación de la astronomía a la navegación, a imagen del de Greenwich, el nuevo observatorio estaría más consagrado a la astronomía per se, más a la imagen del observatorio de París.

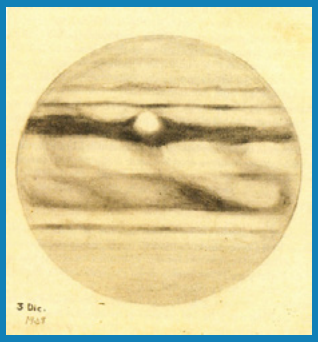
Jorge Juan expuso estas ideas a Carlos III y le propuso, para llevarlas a cabo, que el nuevo observatorio astronómico se construyese en la capital. Siguiendo la sugerencia del marino, se encargó a Juan de Villanueva que trazase los planos de lo que debería ser el edificio que albergase tal institución. El eminente arquitecto lo insertó en el trazado urbano que realizó para el Paseo del Prado y la llamada Colina de las Ciencias, conjunto que también incluía el Gabinete de Ciencias Naturales (hoy Museo del Prado) y el Jardín Botánico. Todo ello un conjunto de gran coherencia urbanística y estilística, utilizando, como leitmotiv y elemento de cohesión, la reiteración arquitectónica característica del neoclasicismo.

El Real Observatorio Astronómico de Madrid se fundaría finalmente en 1790, ya bajo el reinado de Carlos IV, y, como el de Cádiz, fue equipado con una instrumentación altamente competitiva a nivel mundial, entre la que destacaba el Gran Telescopio de 25 pies de William Herschel. Dado lo agitado de la historia de España, es casi un milagro que el Real Observatorio haya llegado hasta nuestros días conservando su actividad científica. Sin embargo, hay que destacar que no toda la historia del Observatorio fue brillante. La invasión napoleónica, que tuvo un gran impacto en la capital, dio al traste con el Observatorio destruyendo el magnífico telescopio de Herschel y saqueando y dispersando la biblioteca. Vinieron luego los motines liberales, la Década Ominosa y la Primera Guerra Carlista. Más de medio siglo tardaría el Observatorio en rehacerse de tanta calamidad.

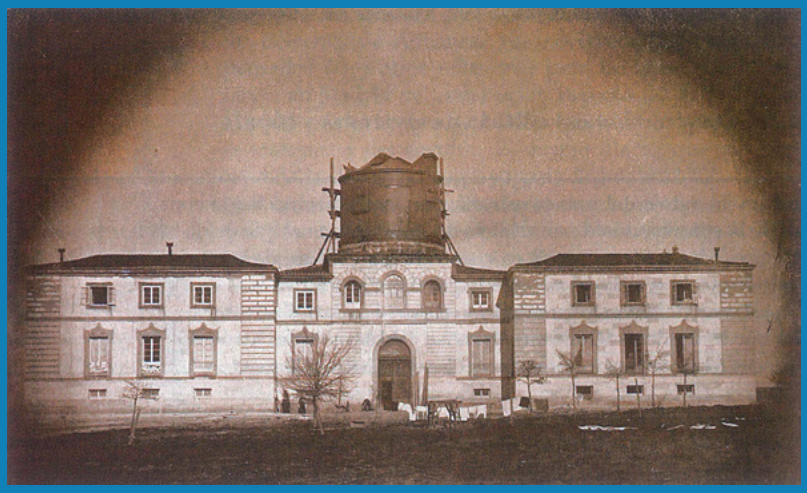
Isabel II hizo un gran esfuerzo tratando de relanzar la actividad científica en España, siguiendo las ideas de los afrancesados y liberales que se iban incorporando a la vida pública. Se crearon entonces la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (en 1853) y diferentes escuelas de ingenieros. En 1851 se emprendió seriamente la reconstrucción del Observatorio: se adquirieron e instalaron nuevos instrumentos, se incluyó el servicio meteorológico y se inició (ya en 1860) la confección del Anuario que, salvo brevísimos paréntesis, se ha continuado publicando puntualmente cada año, desde entonces hasta nuestros días.

El visitante que se acerca al Real Observatorio de Madrid siente hoy una emoción muy especial al contemplar el edificio de Villanueva, o al estar instalado en la bellísima biblioteca,

Comisiones irlandesa y española instaladas en el alto de El Berrocalillo, en las proximidades de Plasencia, para observar el eclipse del 28 de mayo de 1900.



Dibujo de Júpiter realizado por E. Gullón en 1928.



Edificio de viviendas para el personal del Observatorio. En la imagen, se ve en construcción la cúpula cilíndrica de madera para albergar el anteojo Merz.

o en cualquiera de las dependencias de tan singular edificio. En cada rincón se respira la racional geometría, las múltiples simetrías, el espíritu de la Razón. Como un pequeño templo de la astronomía, la obra de Villanueva sobre la colina parece una acrópolis científica que, aún hoy, se esfuerza por mantenerse separada de los ajetreos y la cotidianeidad de la gran ciudad. Obra esencial en el panorama arquitectónico del Siglo de las Luces, el Real Observatorio ha pasado a ser un icono de la Ilustración española.

Si podemos disfrutar hoy del bello edificio tan impecablemente conservado es gracias al cuidadoso esfuerzo de recuperación y restauración que se ha llevado a cabo en el Real Observatorio durante las últimas décadas. Estos trabajos comenzaron el 24 de febrero de 1975, cuando el Real Observatorio encargó al arquitecto Antonio Fernández Alba la restauración del edificio de Villanueva. Fernández Alba, uno de los mejores arquitectos de su generación, académico de la Real Academia Española y de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, se esforzó por redactar un magnífico proyecto para la restauración y consolidación del edificio. Se construyeron aceras, se reformó la carpintería interior y exterior, se reparó la cubierta, etc. Al finalizar las obras, en 1979, quedó patente la altísima calidad del trabajo realizado por el arquitecto, quien recibió en 1980 el Premio Nacional de Restauración del Patrimonio por este trabajo.

En el año 1990, para conmemorar el bicentenario de la creación del Observatorio, se instaló un péndulo de Foucault en la rotonda del edificio de Villanueva. Y en 1995, el edificio, como uno de los exponentes más interesantes de la arquitectura neoclásica española, sería declarado Bien de Interés Cultural.

Además, durante los años 1990, siempre bajo la supervisión de Fernández Alba, se elaboró un plan para la recuperación de los edificios restantes del Observatorio. El edificio Gran Ecuatorial, concebido originalmente como viviendas de astrónomos (construido en 1854-1855 por el arquitecto José M. Aguilar) se convirtió, en 2004-2006, en edificio de despachos para dar cabida al personal que debía seguir realizando las tareas propias de un moderno centro de investigación, personal para el que se preveía un crecimiento sustancial en esa época. En este edificio se había montado, en 1858, un refractor de Merz, con 4,87 m de focal y, hacia 1922, se había instalado un gran anteojo de la marca Grubb, de 8 m de focal, al que se adosó el antiguo Merz. Este, el mayor telescopio de los que sobreviven en el Observatorio, sigue hoy en su emplazamiento original.

En paralelo, se realizó el proyecto y se llevó a término la construcción de la réplica del telescopio de Herschel, y se encargó a Fernández Alba el diseño de un pabellón para albergar tan monumental instrumento. Para ser construido en el recinto del Observatorio, cerca del edificio de Villanueva, dicho pabellón debía, además de cumplir su función, ser digno de tan bello entorno. La réplica del telescopio no había sido diseñada para realizar observaciones reales. Aunque quizás se podría haber intentado, poco se habría conseguido bajo la contaminación lumínica que hoy arruina el cielo de Madrid. Por eso, el nuevo pabellón no fue tampoco pensado para la observación astronómica. Su cúpula de zinc es fija, no permite ver el cielo a partir de una cierta elevación, pero su estructura, con paredes enteramente de cristal, es muy ligera y permite admirar el telescopio en todo su detalle, incluso desde el exterior.

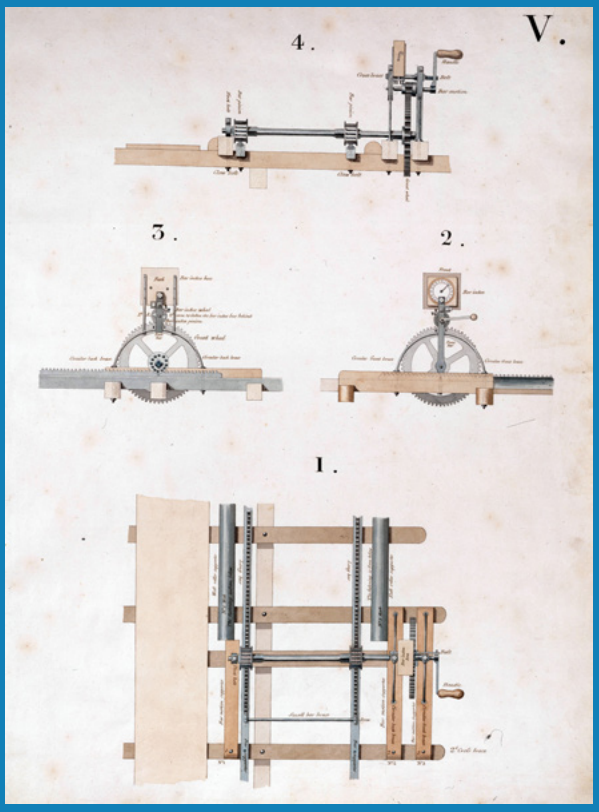


Lámina con detalles de montaje del telescopio de Herschel.

Vista del Observatorio desde la calle de Alfonso XII, en la primera mitad del siglo XX.

Durante el año 2004, es decir, exactamente 200 años tras la realización de las primeras observaciones con el telescopio original de Herschel, se montó el telescopio dentro del pabellón recién construido. No es fácil describir la emoción que uno siente al contemplar este instrumento en el interior de lo que, más que un pabellón, parece un precioso estuche. La belleza y robustez de la madera se conjuga con el metal y las cuerdas, para dar como resultado una estructura ligera que, simultáneamente, comunica una gran estabilidad y precisión. El tubo del telescopio es como un gran dedo índice señalando con exactitud un punto concreto del cielo.

Aprovechando la existencia de unos viejos talleres adosados a la tapia este del recinto del Observatorio, talleres que podían ser demolidos para que su lugar fuese ocupado por un edificio de nueva construcción, se encargó a Fernández Alba el proyecto de un pequeño museo que diera cabida a la colección de instrumentos científicos. Nuevamente el arquitecto demostró su profesionalidad y buen gusto diseñando un edificio que se inserta perfectamente bien en el entorno. Orientado hacia el oeste, el nuevo museo, inaugurado en 2010, está dotado de una bonita cristalera en su fachada desde la que se puede disfrutar de la vista del jardín y, al fondo, del edificio de Villanueva. Dos linternas en la nave central del edificio evocan las formas de las cúpulas de los observatorios astronómicos, haciendo eco a las otras construcciones del recinto.

En paralelo con estos trabajos, durante los últimos treinta años se han sucedido muchas pequeñas obras para la restauración y el mantenimiento continuado de los otros edificios menores del Observatorio. Se han racionalizado y adecentado los jardines organizando todo el espacio en torno a la gran explanada central del recinto. Desde esta ubicación es posible disfrutar de la vista de los edificios que la limitan: del Gran Ecuatorial al Pabellón Herschel definiendo el eje norte-sur y del Villanueva al Museo, subrayando la línea este-oeste.

En el momento de redactar estas líneas (2023) nos encontramos definiendo un proyecto para recuperar el talud que desciende desde el cerrillo hasta la calle Alfonso XII y que es la parte visible del Observatorio para los numerosos viandantes que circulan por esta vía tan transitada. Este proyecto debería conducir al ajardinamiento de este terreno estableciendo un conjunto de soluciones funcionales y constructivas que respeten el ámbito del Observatorio, que subrayen el contexto histórico en el que fue creado y que acentúe la importancia y el protagonismo de la obra de Villanueva.

Los trabajos de protección del Patrimonio y creación artística llevados a cabo en nuestra institución culminaron en julio de 2021, cuando el Real Observatorio Astronómico de Madrid fue incluido en el Patrimonio de la Unesco, representando a las ciencias dentro del "Paisaje de las artes y las ciencias", ahora denominado "Paisaje de la Luz". Es esta una garantía de que el Observatorio seguirá siendo preservado en las mejores condiciones posibles. Emblema de nuestra Ilustración, el Real Observatorio es hoy un tesoro muy querido y bien guardado por los madrileños.

Pero el Real Observatorio Astronómico de Madrid es hoy mucho más que estos bellísimos edificios y jardines. Como sede principal del Observatorio Astronómico Nacional (dependiente del Instituto Geográfico Nacional), es una institución pionera en investigación astrofísica que mantiene vivo el espíritu ilustrado, la inspiración racionalista y el ímpetu tractor de la ciencia.

Radiotelescopio de 40 m del Observatorio de Yebes (Guadalajara).

Observatorio NOEMA (NOrthern Extended Millimeter Array), en los Alpes franceses, fruto de la colaboración entre el CNRS (Francia), Max-Planck-Gesellschaft (MPG, Alemania) y el IGN.

Hoy en día, en el Real Observatorio se reciben datos de algunos de los mejores telescopios del mundo, como los grandes radiotelescopios de 40-m y de 30-m del Observatorio de Yebes (Guadalajara) y del IRAM (Pico Veleta, Granada), respectivamente, NOEMA (en los Alpes franceses), el colosal interferómetro ALMA (en el desierto de Atacama, Chile), o telescopios espaciales. Gracias a estos datos, se llevan a cabo investigaciones punteras en diversos campos de la astrofísica, tanto sobre nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, como sobre galaxias externas. Desde este recinto se realiza, además, una importante labor de vigilancia volcánica, con una especial atención a las islas Canarias. También, la investigación en sismología y gravimetría juega un papel muy relevante en la institución.

Así pues, en el Observatorio se conjuga hoy esta investigación de vanguardia con la historia de nuestra ciencia en un bello marco arquitectónico. Y, por supuesto, este entrañable enclave de la capital también se ha convertido en un lugar donde se realiza una importante labor de difusión científica y cultural, como testifican los miles de madrileños o viajeros que lo visitan cada año.

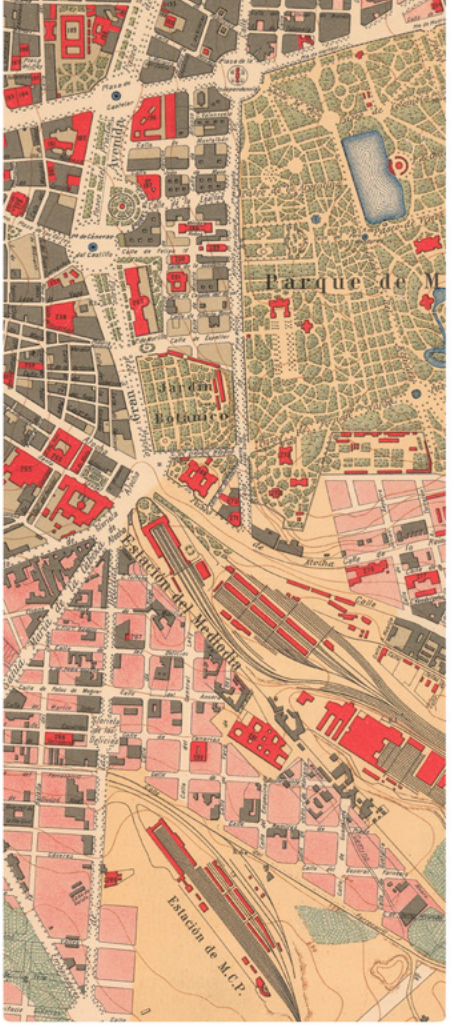
Este libro ofrece un completo recorrido por el Real Observatorio Astronómico de Madrid abarcando tanto sus aspectos históricos como los artísticos y, por supuesto, los científicos. El texto, muy explicativo y ameno, ha sido redactado en su práctica totalidad por Miguel Querejeta, astrónomo del Observatorio, quien también ha supervisado la maquetación del volumen realizada por el especialista cartográfico José Antonio Bolonio.

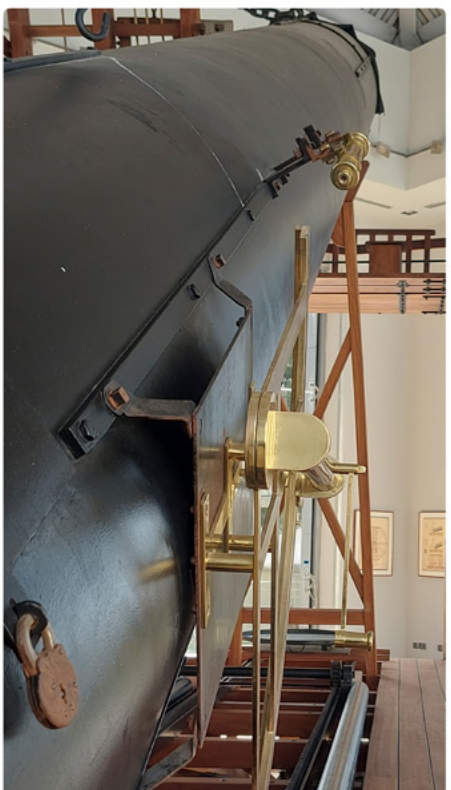
Como no podía ser de otra manera, el recorrido comienza en la rotonda central del edificio de Villanueva, donde se encuentra el péndulo de Foucault que ilustra la rotación diaria de la Tierra. Tras contemplar la interesante colección de instrumentos de la rotonda, nos adentramos en la Sala del Círculo Meridiano, donde durante tantos años se conservó la hora oficial, y desde donde se difundió a toda España. Accederemos después a la espléndida biblioteca que cuenta con maravillosos volúmenes antiguos. Iremos recorriendo a continuación el Gran Telescopio de Herschel y la Sala-Museo, deleitándonos con anécdotas muy poco conocidas de la historia de nuestra ciencia.

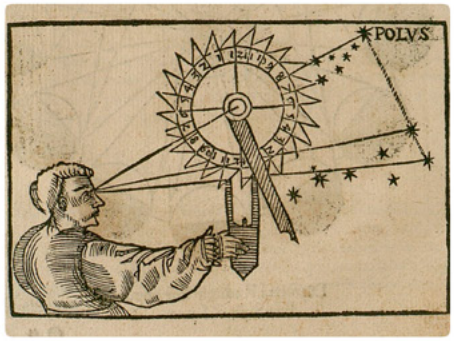
Hoy en día, cuando, gracias a su puntera actividad científica, el Observatorio pasa por uno de los momentos más brillantes de su historia, deseamos seguir inspirándonos en aquellos astrónomos antepasados nuestros, participando en la hazaña colectiva de la investigación científica. Y, como si nos encontrásemos en una nueva Ilustración, en un nuevo hervidero intelectual, queremos seguir participando en la gran aventura de la conquista del conocimiento mediante nuestras observaciones astronómicas, elaboración de cálculos, modelos y teorías, actividades todas con las que ponemos nuestro granito de arena en el estudio del universo. Amigos lectores y visitantes: confiamos en que se unan a nosotros en el empeño.

Rafael Bachiller
Astrónomo y director del Observatorio Astronómico Nacional (IGN)

INTRODUCCIÓN






POLVS

Vista de los jardines del Real Observatorio de Madrid.

UBICACIÓN Y ESTRUCTURA DEL REAL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE MADRID

En el centro de Madrid, junto al parque del Retiro, se esconde uno de los lugares más hermosos y menos conocidos de la capital. Situado en una pequeña colina junto a la puerta del Ángel Caído, donde finaliza la cuesta de Moyano, el Real Observatorio Astronómico de Madrid es una institución con más de 200 años de historia que ha llevado a cabo labores científicas de forma ininterrumpida desde el siglo XVIII hasta nuestros días. En sus orígenes, se fundó como el primer observatorio astronómico con un enfoque científico en España y formaba parte de un ambicioso proyecto urbanístico de Carlos III que aunaba zoología, botánica y astronomía, dando lugar a un ilustrado «eje de las ciencias».

La vista más icónica del Observatorio es, sin duda, la fachada sur del edificio diseñado por Juan de Villanueva a finales del siglo XVIII. En lo alto de la colina se alza un majestuoso pórtico neoclásico sobre el que destaca un delicado templete que recuerda a la Antigüedad clásica. Este edificio se ha convertido en símbolo del Observatorio y ha sido testigo de su historia desde su fundación en el año 1790 hasta nuestros días. El Observatorio ha jugado un papel esencial en la declaración del eje Prado-Retiro como Patrimonio Mundial Unesco, y la imagen de la fachada sur del edificio de Villanueva se ha convertido en epítome de la faceta científica de este *Paisaje de la Luz*.

Este libro propone un paseo por el Real Observatorio de Madrid, que cuenta con un rico conjunto de edificios rodeados por un agradable jardín en el mismísimo centro de la ciudad. Comenzamos este recorrido por el edificio de Juan de Villanueva, uno de los mejores exponentes de arquitectura neoclásica en España. En su interior nos esperan un hipnótico péndulo de Foucault, una espléndida biblioteca y una rica colección de instrumentos científicos.

A lo largo de los siglos XIX y XX se fueron añadiendo otros edificios, que actualmente configuran la visión general del Real Observatorio. Así, a mediados del siglo XIX se construyó un amplio edificio que contenía una cúpula con un telescopio ecuatorial y las antiguas viviendas de los astrónomos. El edificio fue diseñado por José María Aguilar y finalizado en 1855. Cuenta con dos alas simétricas, que siguen una orientación este-oeste a partir de una rotonda central, sobre la que se erige la cúpula con el telescopio Gran Ecuatorial.

Durante la segunda mitad del siglo XIX y casi todo el siglo XX, la plaza de astrónomo incluía el usufructo de una vivienda en el

edificio que hoy conocemos como Gran Ecuatorial. Aunque pueda resultar sorprendente, no es algo tan extraño si pensamos que los astrónomos debían llevar a cabo observaciones nocturnas (y era algo habitual en muchos observatorios europeos). En 2004, se desalojaron definitivamente las viviendas que aún quedaban ocupadas y el edificio fue reconvertido en despachos por el estudio de arquitectura de Antonio Fernández Alba.

Por su parte, en 1901 se construye el Pabellón del Sol, destinado a albergar el recién adquirido material para estudiar eclipses y desvelar la estructura de nuestra estrella. Se trata de un edificio relativamente modesto, con un volumen alargado de única planta y dos pequeñas torres con sendas cúpulas en sus extremos. El proyecto fue realizado por el arquitecto Enrique María Repullés y Vargas, conocido por haber diseñado el edificio de la Bolsa de Madrid.

De igual manera, en 1944 se erige el Pabellón del Astrógrafo, con el objetivo de localizar allí un telescopio que permitía tomar fotografías de objetos celestes. El edificio había sido diseñado por los arquitectos Antonio Rubio y Lorenzo Ortiz, y el propio Antonio Rubio realizó una posterior ampliación en los años 50. En la década de 1980, Fernández Alba llevó a cabo una última intervención arquitectónica sobre el Pabellón del Sol y el Pabellón del Astrógrafo, llevándolos a su volumetría y detalles actuales.

En primer plano, pabellón para alojar el espectroheliógrafo, que permitía obtener imágenes fotográficas solares en determinadas líneas espectrales. En los años 40 fue sustituido por el Pabellón del Astrógrafo. Detrás puede verse el pabellón del Sol.

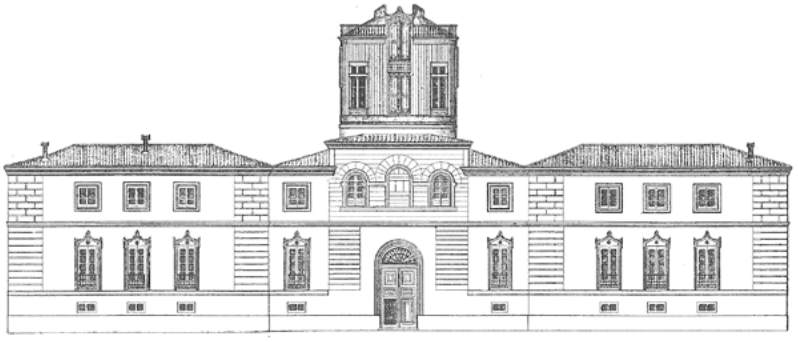
MADRID
Castellana
Almagro
Guindalera
Hospital de la Princesa
Quintana
Trafalgar
Lista
Plaza de Toros de Las Ventas
Ventas
SALAMANCA
Universidad
Recoletos
Goya
Fuente del Berro
La Elipa
Justicia
Biblioteca Nacional
Cibeles
Ibiza
Sol
Ayuntamiento de Madrid
Banco de España
Jeronimos
Plaza Mayor
Niño Jesús
Cortes
PARQUE DEL RETIRO
Museo del Prado
CENTRO
Estrella
Media Legua
Embajadores
RETIRO
Puerta de Toledo
Estación de Atocha
MORATALAZ
ARGANZUELA
Pacífico
Palos de Moguer
Numancia
Acacias
Adelfas
Delicias
Atocha
Chopera
Moscardó
Puente de Andalucía
Almendrales
USERA
Pradolongo
Parque de Pradolongo
Hospital Doce de Octubre
Gran Ecuatorial
Edificio de Villanueva
Sala de Ciencias de la Tierra y del Universo
Edificio del Astrógrafo
Edificio del Sol
Telescopio de Herschel

William Herschel construyó para nuestro Observatorio a finales del siglo XVIII el que probablemente era el mejor telescopio del mundo. Construido en 1796-98, este gran telescopio de 61 centímetros de diámetro y 7,6 metros de distancia focal fue destruido en 1808 durante la ocupación napoleónica. Nos remontaremos a los orígenes de este telescopio y describiremos la réplica, única en el mundo, con la que contamos en el Observatorio. El pabellón que alberga la réplica del telescopio de Herschel fue proyectado por Antonio Fernández Alba.

Por último, inaugurada en 2010, la Sala de Ciencias de la Tierra y del Universo consiste en un pequeño museo de una única planta que muestra al público una rica colección de instrumentos científicos cuyo origen se extiende desde el siglo XVIII hasta nuestros días. Lejos de limitarse a la astronomía, esta exposición enfatiza la relación entre las diversas disciplinas que abarca el Instituto Geográfico Nacional, como son la geodesia, la cartografía y la geofísica, y que, de una manera u otra, guardan relación con la historia del Observatorio. Recordemos que el Observatorio pasó a formar parte del Instituto Geográfico en el año 1904 y, como veremos, la astronomía ha jugado un papel importante en las medidas geodésicas, que son la base para poder desarrollar mapas precisos. El edificio de este museo también fue proyectado por Antonio Fernández Alba e incluye una sala de conferencias en la planta sótano.

En todo caso, la mejor manera de conocer este magnífico recinto dedicado al conocimiento es visitándolo de primera mano. En la actualidad, el Observatorio cuenta con visitas guiadas abiertas al público, así como visitas para centros escolares. Se trata de una verdadera joya arquitectónica y científica que evoca algunos de los momentos estelares de la historia de la ciencia en nuestro país y que nos transporta de Madrid al cielo.

Estudiantes durante una visita guiada al Observatorio.



Proyecto del edificio del Gran Ecuatorial, como edificio de viviendas, con la cúpula cilíndrica de madera para albergar el anteojo ecuatorial de Merz.

1

Astrógrafo
Construido en 1944 con proyecto de Antonio Rubio y Lorenzo Ortiz para la instalación del astrógrafo destinado a la búsqueda de asteroides y cometas.

2

Edificio de Villanueva
De estilo neoclásico, fue diseñado por Juan de Villanueva a iniciativa de Carlos III, comenzando su construcción en 1790.

3

Gran Ecuatorial
Diseñado por José Aguilar y Vela, se terminó de construir en 1855 como edificio de viviendas para los astrónomos. Actualmente está dedicado a despachos.

4

Pabellón Herschel
Diseñado por Antonio Fernández Alba, se inauguró en 2004 para albergar la reproducción del Gran Telescopio de Herschel.

5

Pabellón del Sol
Construido en 1901 con proyecto de Enrique Repullés Segarra para la instalación de los anteojos destinados a las observaciones solares.

6

Sala de Ciencias de la Tierra y del Universo
Proyectada por Antonio Fernández Alba, fue inaugurada en 2010 para albergar la colección de instrumentos científicos del IGN desde el siglo XVIII hasta nuestros días.

1790

Comienza la construcción del edificio principal diseñado por Juan de Villanueva

1855

Termina la construcción del edificio Gran Ecuatorial para viviendas del personal y observaciones

1858

Medición de la base central de la red de triangulación en Madridejos (Toledo)

1846

Narciso Pascual Colomer realiza la primera restauración del edificio Villanueva

1870

Creación del Instituto Geográfico, cuyo primer director será Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero

1802

El Gran Telescopio de Herschel llega al Observatorio (destruido en 1808 por la invasión napoleónica)

1854

Instalación del Círculo meridiano en el salón oriental del Villanueva

1860

Publicación del primer Anuario del Observatorio Astronómico

1882-83

Joaquín María Barraquer determina la intensidad absoluta de la gravedad en la Biblioteca del Observatorio

1856

Conexión telegráfica con el reloj de la Puerta del Sol para dar la hora oficial

1875

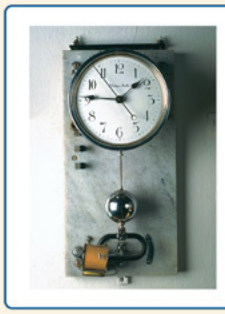
Publicación de la primera hoja del Mapa Topográfico Nacional 1/50.000 (Hoja 559 Madrid)

1901

Enrique Repullés construye el pabellón del Sol para albergar los anteojos Grubb

1904

El Real Observatorio Astronómico de Madrid se incorpora al Instituto Geográfico

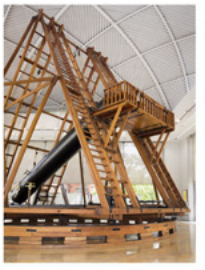


1950

Conexión telefónica con Radio Nacional para emitir las señales horarias del reloj patrón de tiempo medio de hora oficial en España (reloj Brilliè)

1975

Se inicia la restauración del edificio Villanueva bajo la dirección de Fernández Alba, proyecto por el que obtiene el Premio Nacional de Restauración



2004

Inauguración de la réplica del Gran Telescopio de Herschel

MINISTERIO DE CULTURA

13442 *REAL DECRETO 754/1995, de 5 de mayo, por el que se declara bien de interés cultural, con categoría de monumento, el edificio del Observatorio Astronómico, obra del arquitecto Juan de Villanueva, sito en la calle Alfonso XII, número 5, en Madrid.*

El Ministerio de Educación y Ciencia en fecha 4 de junio de 1877 tiene expedida la declaración de monumento a favor del edificio del Observatorio Astronómico de Madrid.

La caracterización del citado expediente, de conformidad con lo establecido en la disposición transitoria sexta, apartado 1, de la Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español, en la forma a efectos según lo dispuesto en el artículo 1.3 del Real Decreto 111/1986, de 10 de enero, de desarrollo parcial de la Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español, en el Reglamento para su aplicación de 16 de abril de 1936, y la Ley de Procedimiento Administrativo de 17 de julio de 1958.

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 8 b) y 9.2 de la Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español, corresponde al Ministerio de Cultura la incoación y tramitación del expediente, dado que el citado edificio está gestionado por la Administración del Estado.

En virtud de lo expuesto y de acuerdo con lo establecido en la disposición transitoria sexta, apartado 1, el artículo 8 b) y 14.2 de la Ley 16/1985, y el artículo 1.6 del Real Decreto 111/1986, de 10 de enero, de desarrollo parcial de la Ley 16/1985, según la redacción dada por el artículo 2.4 del Real Decreto 64/1994, de 21 de enero, por el que se modifica el anterior, a propuesta de la Ministra de Cultura y previa deliberación del Consejo de Ministros en su reunión del día 5 de mayo de 1995,

DISPONGO:

Artículo 1.

Se declara bien de interés cultural, con categoría de monumento, el edificio del Observatorio Astronómico, obra del arquitecto Juan de Villanueva, en la calle Alfonso XII, número 5, en Madrid.

1995

El edificio Villanueva es declarado Bien de Interés Cultural

1990

Se instala un péndulo de Foucault en la nave central del edificio Villanueva

2010

Inauguración de la Sala-Museo de las Ciencias de la Tierra y del Universo

2021

El Real Observatorio de Madrid es declarado Patrimonio Mundial de la Unesco como parte del «Paisaje de la Luz»

EDIFICIO DE VILLANUEVA

Fragmento de la «Topographia de la Villa de Madrid» realizada por Pedro Texeira en 1656 (facsímil reproducido en el Instituto Geográfico en 1881).

UN OBSERVATORIO ILUSTRADO EN EL EJE DE LAS CIENCIAS

Los orígenes del Observatorio

Los orígenes del Real Observatorio de Madrid se remontan al siglo XVIII, reinando en España Carlos III, rey ilustrado por excelencia y del que se dice que era el mejor alcalde de Madrid. El Observatorio fue fundado a sugerencia del gran marino Jorge Juan, que propuso crear en esta esquina de Madrid un observatorio astronómico a la imagen de aquellos con los que contaban por aquel entonces otras capitales europeas. Carlos III no llegó a ver el proyecto de construcción del Observatorio iniciado, ya que la primera piedra se coloca en el año 1790, reinando ya Carlos IV, momento en que se firma su decreto de constitución.

Estatua del monarca Carlos III, impulsor del Real Observatorio de Madrid, en los jardines del Observatorio.

El Observatorio responde al espíritu de la Ilustración, movimiento que se desarrolla principalmente en Europa y que otorga una gran importancia a la razón y al conocimiento científico como herramientas para mejorar la sociedad. Uno de los frutos más representativos de la Ilustración es la primera Enciclopedia, compuesta en Francia por Denis Diderot y Jean le Rond d'Alembert. En España, Carlos III trató de poner en práctica estas ideas ilustradas en un nuevo desarrollo urbano para Madrid. Aquí se encuadra su proyecto del llamado «Eje de las Ciencias», que discurría aproximadamente a lo largo del actual paseo del Prado. Lo que hoy en día es el Museo Nacional del Prado estaba inicialmente destinado a ser Gabinete de Ciencias Naturales y sede de la Academia de Ciencias, aunque nunca llegó a utilizarse con este fin: fue inaugurado directamente como Museo Real de Pinturas en 1819. Inmediatamente al sur se situaba el Real Jardín Botánico, que aún hoy cumple esa función.

Por último, algo más al sureste, sobre la colina de San Blas, se situaba el Real Observatorio Astronómico, que cerraba este eje dedicado a los saberes científicos. Así, se abarcaba el estudio de la zoología, botánica y astronomía, y se reunía en una sola avenida todo el espíritu y el impulso de aquella brillante Ilustración.

Hoy en día, la contaminación lumínica nos impide realizar observaciones astronómicas profesionales desde este recinto, pero, a finales del siglo XVIII, la situación era bien diferente. Por aquel entonces, el cerrillo de San Blas se encontraba al final de la ciudad de Madrid y, al no existir luz eléctrica, era un lugar oscuro con muy buena visibilidad del cielo. Así, constituía un enclave magnífico para observar las estrellas.

El proyecto original de Villanueva

El proyecto del edificio principal del Observatorio se encargó a Juan de Villanueva, el mejor arquitecto de la época. Con esta decisión se buscaba dotar de homogeneidad arquitectónica al «Eje de las Ciencias», habiendo firmado Villanueva tanto el primer proyecto del Museo del Prado como el del Jardín Botánico. Las tres construcciones se desarrollan así en el estilo imperante en la época: el neoclasicismo.

El edificio del Real Observatorio representa a la perfección el espíritu neoclasicista, caracterizándose por su sobriedad y simetría. El esbelto pórtico de la fachada principal, orientada al sur, está sustentado por columnas de capiteles corintios que recuerdan a la arquitectura de la Grecia clásica. El templete superior que corona el edificio se sustenta a su vez en un conjunto de dieciséis columnas de granito rematadas por capiteles jónicos. Se combinan así de una forma muy armónica distintos elementos arquitectónicos de la Antigüedad clásica.

Detalle de los capiteles del pórtico y el templete del edificio de Villanueva.

El único elemento que rompe la apariencia general de simetría consiste en una abertura y una protuberancia abovedada en el ala este del edificio. Estas protuberancias son adiciones posteriores al diseño original y están relacionadas con la actividad que se estuvo llevando a cabo en el interior de dicha ala desde mediados del siglo XIX hasta finales de los años 1960: el cálculo, registro y difusión de la hora oficial española.

Jorge Juan, astrónomo y geodesta

Jorge Juan y Santacilia fue un marino ilustrado que vivió en el siglo XVIII y que tenía profundos conocimientos de matemáticas, ingeniería naval y astronomía. Junto a Antonio de Ulloa, participó en una importante misión a Ecuador (por aquel entonces, Virreinato del Perú), con el fin de medir la longitud precisa a la que correspondía un grado de meridiano. Este proyecto formaba parte de una colaboración internacional para determinar la forma geométrica de la Tierra. Comparando con las mediciones llevadas a cabo por Maupertuis en Laponia, pudieron concluir que la Tierra no es una esfera perfecta, sino que se encuentra achatada por los polos, lo que constituyó un espaldarazo a la teoría de la gravitación de Newton.

Jorge Juan había viajado mucho y sabía que las grandes capitales europeas tenían sus observatorios astronómicos, como el de París, Londres (Greenwich) o Berlín (Potsdam), mientras que Madrid por aquel entonces no tenía un observatorio. De ahí que convenciera a Carlos III para embarcarse en este proyecto. Los jardines del Observatorio cuentan con un monumento a Jorge Juan como homenaje al impulsor de esta institución.

Retrato de Jorge Juan realizado en 1828 por Rafael Tejeo (Museo Naval de Madrid) y escultura en su honor en los jardines del Observatorio.

Organizado en torno a una rotonda central, volumétricamente el edificio de Villanueva muestra fuertes similitudes con el esquema de la villa renacentista italiana. Podemos pensar, por ejemplo, en la Villa Capra de Andrea Palladio en Vicenza, que también se articula en torno a una rotonda central. El templete tiene una función ornamental: nunca se llevaron a cabo aquí observaciones astronómicas sistemáticas (solo algunas medidas meteorológicas).

Villanueva pasó seis años becado en Roma y esa estancia podría haberle proporcionado inspiración para el edificio del Observatorio. En particular, el templete bien podría estar inspirado por el *tempietto* de San Pietro in Montorio de Bramante o el templo de Vesta en Tívoli. En el templete, cada columna jónica tiene su correspondiente pilastra sobre la que se aloja el cerramiento, rematada por una cúpula semiesférica. Así se combinan las columnas, especialidad de Palladio, con las pilastras, tan características de la arquitectura de Alberti. Se trata, en definitiva, de una obra maestra de la arquitectura neoclásica en España.

Juan de Villanueva. Retrato de Francisco de Goya, realizado hacia 1805. Real Academia de Bellas Artes de San Fernando.

El proyecto inicial de Villanueva contaba con una escalinata de acceso cubierta que permitía salvar el desnivel frente al edificio. Esta doble escalinata de entrada se encontraba alojada en un cuerpo de ladrillo rematado por un antepecho de sillares de granito. Además, existía también una rampa lateral que permitía el acceso con vehículos. Actualmente, esta escalinata se encuentra enterrada.

El acceso actual al recinto del Observatorio es desde el norte, por la parte posterior del edificio de Villanueva, de forma que es necesario rodearlo para llegar al pórtico. En los edificios clásicos y neoclásicos lo habitual era configurar los pórticos de manera que dieran la bienvenida a quien se acercara a ellos: este era el efecto que causaba la entrada al Observatorio originalmente. Al encontrarse despejado el terreno hacia el sur, las personas que se acercaran al Observatorio podían contemplarlo desde la distancia y salvar la diferencia de cota mediante la escalinata que comentábamos o la rampa. A finales del siglo XIX se decidió cancelar este acceso interior, ya que se decía que daba cobijo a maleantes, y la escalera acabó siendo enterrada en la década de 1940. Hoy, tras la urbanización del entorno, los edificios situados en el lado sur del Observatorio dejan muy poco margen frente a la escalinata y hacen que se pierda por completo la perspectiva con la que se contaba en el proyecto inicial.

Villanueva en Roma

En 1758, Juan de Villanueva obtiene a los diecinueve años su plaza de pensionado en Roma, lo que podríamos considerar el Erasmus de la Ilustración. Su estancia allí dura seis años, en los que se encuentra inmerso en el estudio del arte clásico, renacentista y neoclásico, que tendrán un evidente impacto en su obra posterior.

En Italia, Villanueva encontrará dos grandes fuentes de inspiración: los templetes, como el de Vesta en Tívoli o el de Bramante en San Pietro in Montorio, y la arquitectura de Andrea Palladio. La gran fascinación que el arquitecto sentía por estos elementos se ve reflejada en el constante dibujo que realizaba de los mismos, prestando atención a detalles que posteriormente encontramos en sus construcciones.

Es posible reconocer así en el Real Observatorio un claro gusto por la simetría, los juegos de luces y sombras, la rotonda y los elementos propios de la Antigüedad clásica. Obra maestra del clasicismo, el templete del Observatorio se diseñó con función ornamental, y nunca ha albergado telescopios, aunque sí se llevaron a cabo ahí algunas medidas meteorológicas. Cuenta con una serie de columnas de orden jónico con pilastras adosadas, combinando así las fascinaciones del arquitecto en un módulo que corona la construcción de manera majestuosa, y que aún en la actualidad hace del Observatorio un referente en el entorno del Paisaje de la Luz.

A la izquierda, el templete de San Pietro in Montorio en Roma (Bramante, hacia 1510) y a la derecha, el templete del Real Observatorio de Madrid (Villanueva, 1790-1808).

La evolución del edificio de Villanueva: una historia accidentada

En el edificio del Observatorio se han realizado varias modificaciones importantes a lo largo de su historia. La guerra de Independencia lo dejó en mal estado y no se produjo una restauración completa hasta mediados del siglo XIX. En la segunda mitad del siglo XX, el arquitecto Antonio Fernández Alba llevó a cabo una nueva intervención que dejó el edificio en el estado actual y que le valdría el Premio Nacional de Restauración en 1980.

En 1808, el edificio estaba casi acabado: solo faltaba acristalar el templete y producir y colocar las esculturas de Gea y Urania que estaban previstas para las hornacinas al fondo del pórtico. Pero, en ese momento, España sufre la invasión napoleónica que da comienzo a la guerra de Independencia. Por su localización estratégica, las tropas francesas eligieron este lugar para instalarse y llevaron a cabo maniobras militares, dejando el edificio del Observatorio muy deteriorado y destruyendo el magnífico telescopio de 25 pies que William Herschel había construido para Madrid, del que hablaremos más adelante.

Tras una época de declive y miseria, ya en tiempos de Isabel II se produce la refundación del Observatorio bajo el impulso del Director General de Instrucción Pública, Antonio Gil de Zárate. En 1846 se finaliza la restauración del edificio de Villanueva, encargada a Narciso Pascual Colomer, arquitecto mayor de Isabel II.

Pascual Colomer había diseñado, entre otros, el conocido edificio del Congreso de los Diputados. En el Observatorio, añadió algunos elementos nuevos, como

Dibujo de Isidro González Velázquez, arquitecto y discípulo de Villanueva, que muestra el proyecto inicial del Observatorio (tinta y aguada de dos colores sobre papel, Museo de Historia de Madrid).

la barandilla de época isabelina sobre la cornisa, en lugar del pequeño muro de cierre proyectado por Villanueva, y los cupulines delanteros sobre la azotea del edificio. El proyecto inicial de Villanueva solo contaba con los dos cupulines posteriores, orientados hacia el norte, para dar acceso a la azotea mediante una escalera de caracol. Pascual Colomer aumenta así la simetría del edificio, aunque algunos arquitectos consideran que esto desvirtúa el proyecto de Villanueva. En la restauración de los años 70, Fernández Alba decidió mantenerlos, ya que llevaban más de cien años ahí y formaban ya parte de la historia del edificio.

A mediados del siglo XIX, se practica una abertura en el ala este del edificio de Villanueva con el fin de instalar ahí un telescopio de tipo círculo meridiano que describiremos a continuación. Como curiosidad, existía un error de alineación en la ejecución original del edificio, que no se encontraba orientado correctamente sobre el eje este-oeste. Por esta razón, fue necesario aplicar una corrección al practicar esta abertura, y por eso la fina ventana resultante no es exactamente paralela a la pared este. Además, para poder instalar un colimador que permitía ajustar la alineación del telescopio meridiano, se construyeron dos pequeñas protuberancias en dicha ala, justamente al pie de la ventana a lo largo de la cual se observa con el telescopio.

Por sorprendente que pueda parecer, como parte de la accidentada historia del Observatorio, en la década de 1870 el templete de Villanueva estuvo a punto de desaparecer. La utilidad práctica de las observaciones astronómicas y meteorológicas llevó al director de aquella época a proponer modificar o eliminar el templete para construir en su lugar una azotea. Por suerte, dicha reforma nunca llegó a realizarse.

En 1975, se encargó la restauración del edificio de Villanueva a Antonio Fernández Alba. Tras numerosos retrasos burocráticos, las obras ya estaban finalizadas en 1979, y este proyecto le valió a Fernández Alba el Premio Nacional de Restauración (1980). Como curiosidad, cabe destacar que hasta 1970 el Mapa Topográfico Nacional utilizaba como origen de longitudes el meridiano de Madrid, que pasaba por el centro del edificio de Villanueva. A partir de 1970, comenzó a utilizarse el meridiano de Greenwich, adoptado internacionalmente en 1884, también en la cartografía española.

Detalle en el exterior y en el interior del ala este del edificio de Villanueva, de la protuberancia para alojar el colimador que permite alinear el telescopio meridiano.

Antonio Fernández Alba y la importancia de la restauración

Juan de Villanueva no es el único arquitecto que participó en la consolidación del Real Observatorio tal y como lo conocemos hoy. A finales del siglo XX se hizo evidente la necesidad de restaurar las obras llevadas a cabo en el siglo XVIII por el arquitecto original, proyecto encargado a Antonio Fernández Alba. Su plan contaba con dos fases: en primer lugar, consolidar la arquitectura original de Villanueva y restituir todo aquello que había sufrido daños con el paso del tiempo. En la segunda fase, Fernández Alba proyectó el pabellón que albergaría la réplica del telescopio de Herschel y el Museo que se describirá más adelante. Estos fueron realizados respetando la estética neoclásica planteada originalmente por Villanueva, pero sin falsear el período histórico al que pertenecen.

Fernández Alba (Salamanca, 1927) ha sido reconocido en dos ocasiones con el Premio Nacional de Arquitectura, la segunda de ellas como tributo a toda su carrera. Actualmente, es miembro de la Real Academia Española, donde ocupa el sillón de la «o» minúscula desde 2006, y de la de Bellas Artes.

Lámina de Antonio Fernández Alba que muestra la remodelación del recinto del Observatorio. Vista en perspectiva.

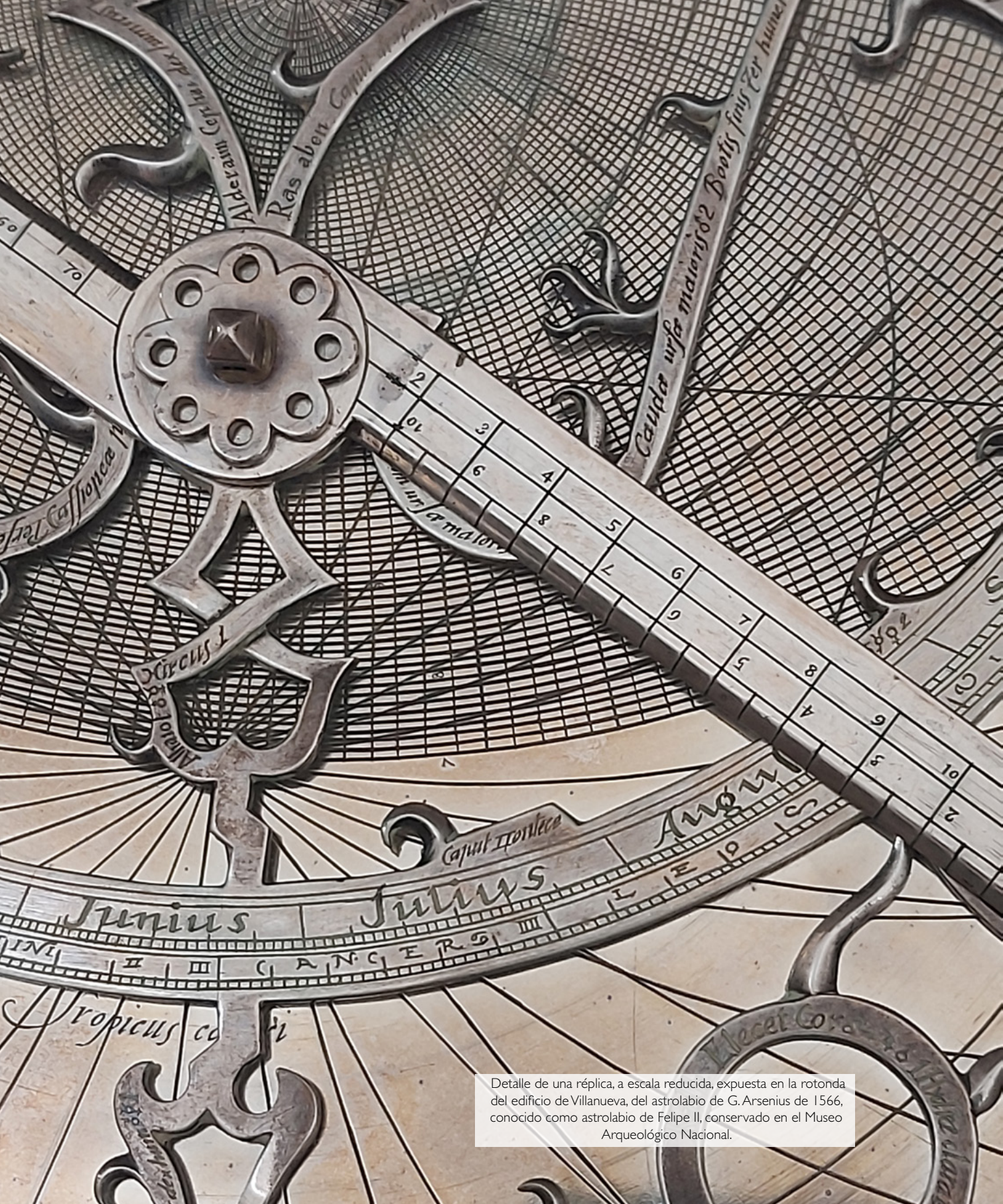
Uso actual del edificio y Patrimonio Mundial

El edificio de Villanueva está hoy en día dedicado a la conservación y difusión de su patrimonio histórico. Desde el verano de 2021, el Real Observatorio de Madrid está incluido en la lista de Patrimonio Mundial Unesco dentro del eje Prado-Retiro, en la categoría de Paisaje Cultural. Con ello, la Unesco ha reconocido la relevancia de aunar, en un entorno urbano, naturaleza, cultura y ciencia desde mediados del siglo XVI hasta nuestros días. Es el llamado *Paisaje de la Luz,* eslogan bajo el cual se promocionó la candidatura a Patrimonio Mundial Unesco del «Paseo del Prado y el Buen Retiro: Paisaje de las artes y las ciencias», aprobada el 25 de julio de 2021.

El edificio de Villanueva está declarado además Bien de Interés Cultural, siendo esta la más alta categoría de protección patrimonial dentro de la legislación española. Esta condición fue obtenida en 1995 al ser uno de los más interesantes ejemplos de arquitectura neoclásica española.

Además de su incalculable valor histórico y artístico, el Real Observatorio ha conservado vivo su espíritu ilustrado hasta nuestros días. En sus instalaciones se siguen realizando hoy observaciones astronómicas, aunque en modo remoto, utilizando grandes radiotelescopios en otras ubicaciones del planeta, y se desarrollan investigaciones de primer nivel internacional sobre el origen y evolución de estrellas y galaxias. Asimismo, acoge la sede de un grupo de geofísica del IGN, que gestiona los sistemas e infraestructuras de alerta y vigilancia de desastres naturales como los ocasionados por terremotos o crisis volcánicas. Para ello, cuenta con una colección de modernos despachos en el edificio Gran Ecuatorial, el que durante un siglo y medio albergara las viviendas de los astrónomos.

Límites del «Paseo del Prado y el Buen Retiro: Paisaje de las artes y las ciencias», Patrimonio Mundial de la Unesco y logotipo sobre el pavimento de la zona.



Detalle de una réplica, a escala reducida, expuesta en la rotonda del edificio de Villanueva, del astrolabio de G. Arsenius de 1566, conocido como astrolabio de Felipe II, conservado en el Museo Arqueológico Nacional.

LA ROTONDA CENTRAL Y EL PÉNDULO DE FOUCAULT

La rotonda y los telescopios de Herschel

La rotonda es la sala central del edificio de Villanueva y alberga algunas de las piezas más notables de la colección del Observatorio.

A ambos lados del acceso desde el pórtico, hallamos dos de las piezas más representativas de la colección. Se trata de dos telescopios de madera de unos dos metros de longitud y 20 centímetros de diámetro adquiridos en los primeros años de vida del Observatorio. Ambos telescopios fueron construidos a finales del siglo XVIII por el astrónomo alemán William Herschel (1738-1822). Además de un reputado científico, autor de importantes descubrimientos, Herschel está considerado el mejor constructor de telescopios de la historia. Por desgracia, el sistema óptico de estos telescopios se perdió con los años.

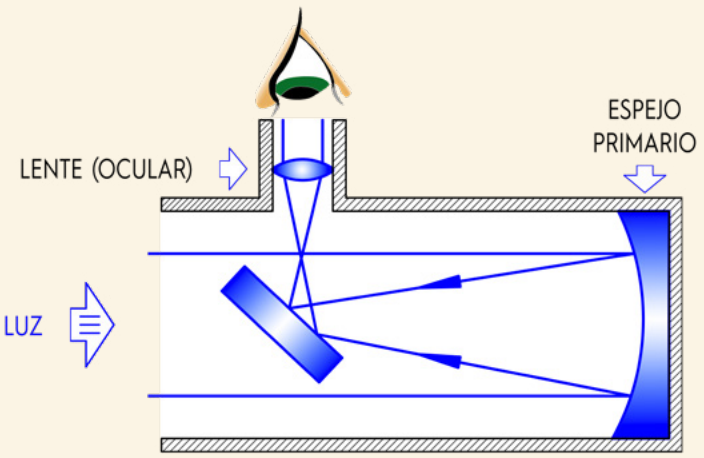
Con un telescopio similar a estos, William Herschel descubrió el planeta Urano en 1781. Esto lo hizo mundialmente famoso: hasta entonces, además de la Tierra, solo se conocían los cinco planetas que son visibles a simple vista (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno); así, supuso una verdadera revolución que Herschel demostrara que hay otro planeta más, uno con el que absolutamente nadie contaba. Por si fuera poco, Herschel también descubrió los dos satélites más grandes de Urano y, midiendo su período orbital, pudo determinar la masa del planeta y estimar su densidad, que es mucho menor que la de la Tierra.

Uno de los telescopios originales de William Herschel en el Real Observatorio de Madrid.

¿Cómo funciona un telescopio?

Cuando pensamos en un telescopio, la imagen que a casi todos nos viene a la mente es un tubo largo con dos lentes. Esto es lo que conocemos como telescopio refractor, porque las lentes cambian la dirección de propagación de los rayos de luz. Así, la primera lente concentra los rayos de luz en un punto que llamamos foco y la segunda permite formar una imagen justo delante del ojo del observador. Sin embargo, los primeros telescopios refractores tenían un problema, y es que, debido a la baja calidad del vidrio, los rayos de luz de distintos colores no convergían en el mismo punto, dando lugar a distorsiones en la imagen que conocemos como aberración cromática. Además, para hacer telescopios cada vez más grandes, las lentes resultan demasiado pesadas y hacen difícil que el telescopio se mantenga rígido.

A Isaac Newton se le ocurrió una solución a este problema: utilizar espejos en lugar de lentes. En los telescopios reflectores, como los que construyó William Herschel, un espejo cóncavo concentra la luz en el foco, y una pequeña lente (ocular) nos permite obtener la imagen aumentada. En el espejo, los rayos de todos los colores se reflejan de la misma manera, dando lugar a imágenes más nítidas. En la actualidad, prácticamente todos los telescopios profesionales son de tipo reflector.

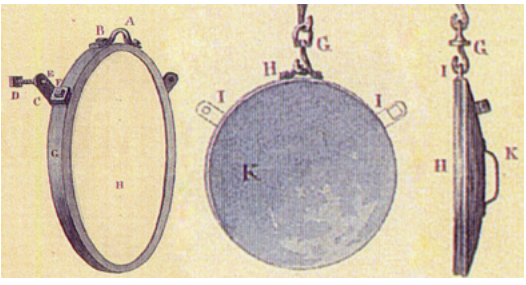


Esquema de un telescopio reflector newtoniano.

Estos telescopios eran parte del encargo que se hizo a William Herschel a finales del siglo XVIII, y acompañaban al gran telescopio del que hablaremos a continuación. En este sentido, podríamos decir que eran telescopios auxiliares, que con su menor tamaño facilitaban hacer observaciones que requirieran cambiar de posición con frecuencia.

Además de estos hermosos y manejables telescopios de madera, en 1802, Herschel entregó al Observatorio un enorme telescopio de unos 8 metros de longitud que, por su calidad óptica y su tamaño, era uno de los más potentes de su época. Por desgracia, el instrumento quedó destruido cuando las tropas francesas que controlaban Madrid ocuparon el edificio. Al comenzar la guerra de Independencia, los astrónomos sospecharon lo que podía ocurrir y escondieron fuera del Observatorio los espejos y los planos originales del telescopio. Así, por suerte, se han salvado hasta nuestros días el espejo primario y su recambio. Se trata de unos espejos ligeramente cóncavos de 60 centímetros de diámetro, uno de los escasos vestigios de uno de los instrumentos más preciados de la historia del Observatorio. Además, siguiendo los planos originales, a comienzos del siglo XXI fue posible llevar a cabo una reproducción fidelísima del gran telescopio de Herschel a tamaño natural, que describiremos después.

El espejo del gran telescopio de Herschel está hecho de bronce, con una aleación cuya composición exacta era secreto del constructor. En sus notas, vemos que Herschel experimentó con distintas aleaciones que no le convencían, por no ser suficientemente robustas o por no resultar fáciles de pulir, hasta que encontró la aleación óptima, de la que no dejó constancia. A simple vista, el espejo puede dar la impresión de ser plano. En efecto, si se tratara de un espejo esférico, este sería el casquete de una esfera de más de 15 m de diámetro, lo que explica que la curvatura sea tan sutil.



Espejo tal como aparece en los planos de Mendoza. Se aprecian los elementos de sujeción y el aro para su extracción mediante cuerda y polea.

Espejo original del gran telescopio de Madrid construido por William Herschel.

El péndulo de Foucault

En la rotonda central destaca un gran péndulo de Foucault que se instaló en 1990 para conmemorar el bicentenario del Observatorio y que demuestra la rotación de la Tierra. Mientras la Tierra gira sobre su eje, el péndulo oscila en un plano fijo en el espacio; así, al cambiar progresivamente su orientación relativa al edificio, el péndulo va derribando los pivotes de madera que lo rodean.

El péndulo del Observatorio tiene una longitud de 15 metros y una masa de 100 kg. Esto proporciona al péndulo una gran inercia, lo que hace que, una vez puesto en movimiento, se mantenga oscilando durante una buena cantidad de tiempo sin pararse. Aun y todo, como consecuencia del rozamiento con el aire, el péndulo pierde una pequeña cantidad de energía en cada oscilación y por eso, poco a poco, va disminuyendo la amplitud de sus oscilaciones. Para contrarrestar esta pérdida de energía, el péndulo cuenta con un electroimán en la parte superior, que, a cada paso por el centro, proporciona un minúsculo impulso a un cilindro de acero situado sobre el extremo superior del cable. Así se compensa la pérdida de energía por rozamiento y el péndulo mantiene su oscilación sin parar durante horas.

El péndulo oscila siempre en el mismo plano respecto a las estrellas. Por eso, según pasa el tiempo, la Tierra sobre la que pisamos irá rotando respecto al péndulo. Alrededor del eje del péndulo se sitúa un gran círculo anclado al suelo, con un conjunto de pivotes de madera. Al encontrarse con estos pivotes a su paso, el péndulo los va derribando. El tiempo que tarda el péndulo en dar una vuelta completa y volver a la configuración inicial depende de la latitud a la que nos encontremos. A la latitud de Madrid, el péndulo tarda 37 horas en girar 360°. Como hay 72 pivotes, y el péndulo los derriba por ambos lados en sus oscilaciones, en la mitad de tiempo (18 horas y media) el péndulo habrá derribado todos los pivotes. Por lo tanto, cada 30 minutos, aproximadamente, el péndulo derriba sendos pivotes situados en lados opuestos.

Péndulo de Foucault en el edificio de Villanueva.

El péndulo de Foucault

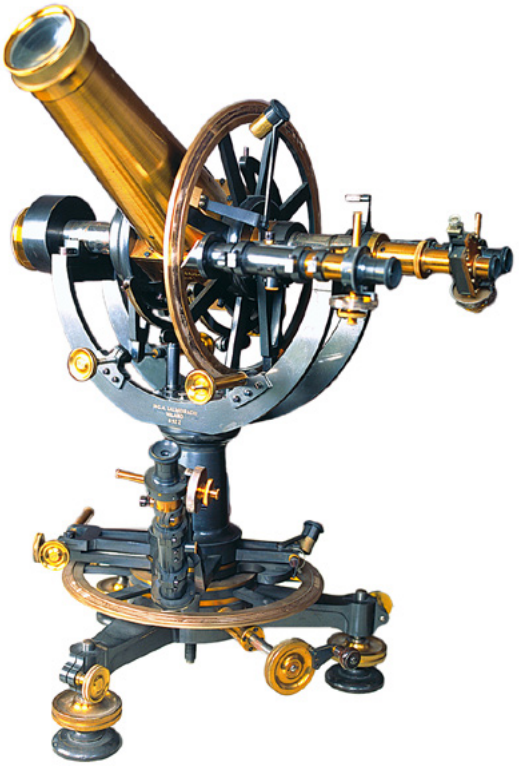
En 1851, el físico francés Léon Foucault instaló por primera vez un péndulo similar en París con el que demostró la rotación de la Tierra sobre sí misma. Tras un primer experimento en el Observatorio de París, Foucault llevó a cabo una demostración pública de este efecto en marzo de 1851 en el Panteón de París, en pleno Barrio Latino. Aquel péndulo tenía una longitud de 67 m y pesaba 28 kg. Varios de los péndulos originales utilizados por Foucault se conservan en el Musée des Arts et Métiers de París. En el Panteón podemos admirar una copia del péndulo original en pleno funcionamiento.

En el polo norte (o sur) terrestre el péndulo necesitaría 24 horas para dar una vuelta completa, ya que nos encontramos justamente sobre el eje de rotación de la Tierra (para ser precisos, tardaría 23 horas y 56 minutos, un día sidéreo). Según vamos a latitudes más bajas, el péndulo tarda más y más en dar una vuelta completa. En concreto, el tiempo necesario para que el plano del péndulo gire 360 grados viene dado por 24 horas dividido por el seno de la latitud. En París tarda unas 32h, mientras que en Madrid tarda unas 37h. En el ecuador, el péndulo está situado en perpendicular al eje de rotación de la Tierra: se desplaza con ella, pero no ve una rotación aparente debajo, por lo que el plano de oscilación del péndulo no gira. En el hemisferio norte, el péndulo gira en sentido horario, mientras que en el hemisferio sur el péndulo gira en sentido antihorario. Así, si estamos muy perdidos, observando el sentido de giro de un péndulo de Foucault podemos saber en qué hemisferio nos encontramos.

Péndulo de Foucault en el Panteón de París.

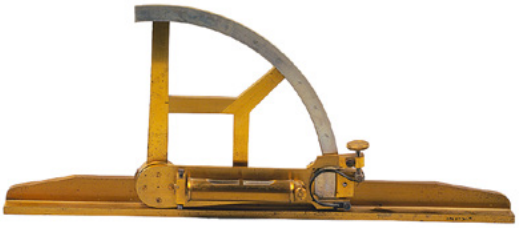
Instrumentos expuestos

Las vitrinas que circundan la rotonda muestran otros instrumentos fabricados entre el siglo XVIII y los inicios del siglo XX, y que fueron empleados en las distintas tareas encomendadas al Observatorio durante su historia. Muchos de ellos son aparatos con los que se determinan ángulos con precisión para mediciones astronómicas, topográficas o geodésicas.



Teodolito astronómico que fue fabricado en torno a 1900, y que se empleó para determinar latitudes y para la observación del eclipse de Sol del 28 de mayo de 1900.

Balanza sismológica de finales del siglo XIX. Con este aparato se estimaba la dirección de propagación de un seísmo según la posición en la que quedaba su pieza central tras sufrir el temblor. Además, el salto de esta pieza desequilibraba la balanza, con lo cual se accionaba un dispositivo eléctrico que determinaba la hora del seísmo.



Clisímetro (hacia 1830). Este instrumento permite medir el ángulo de inclinación de cualquier superficie, sobre la que ponemos la regla y vamos girando el nivel hasta calar la burbuja. El índice marca en el limbo el ángulo entre la superficie y la horizontal. Tuvo gran difusión en el ámbito militar para el emplazamiento y la medida del ángulo de tiro en artillería.

¿Qué es un cañón meridiano?

Este es uno de los instrumentos más llamativos de las vitrinas que rodean la rotonda. Es un aparato científico recreativo constituido por un reloj de sol que lleva acoplado un cañón que anuncia el mediodía. Ubicado en el plano del meridiano, con el cañón apuntando al sur, el gnomon proyecta la sombra sobre la escala horaria de la base; la hora marcada corresponde al tiempo solar verdadero del punto de instalación. En el momento del mediodía, la lupa concentra los rayos solares justamente en el oído del cañón, produciéndose la detonación de la pólvora y anunciando el mediodía. La lupa es abatible para ajustarla a la declinación solar a lo largo del año. Este tipo de relojes se hicieron muy populares en el siglo XVIII y comienzos del siglo XIX, y llegaron a instalarse ejemplares de gran tamaño en parques públicos para producir una señal acústica al mediodía.

Cañón meridiano.

Círculo meridiano. Real Observatorio de Madrid.

SALA DEL CÍRCULO MERIDIANO

El círculo meridiano y la medida del tiempo

La sala del círculo meridiano recibe este nombre en honor al telescopio que la preside, que fue instalado en 1854. Para poder llevar a cabo la labor de observación de los astros, se hicieron las aberturas en los muros, exactamente en dirección norte-sur, corrigiendo la orientación ligeramente errónea que presentaba el edificio. Además, se dotó al telescopio de una escalera que permitía subir a una plataforma para poder leer los círculos del anteojo.

También se dispuso de un magnífico sillón reclinable y rodante en sendos carriles, en el que se sentaba el astrónomo para observar los astros y determinar el momento exacto en que cruzaban el meridiano del lugar. Durante siglos, la rotación de la Tierra era, por decirlo así, el reloj natural más preciso con el que se contaba. Las unidades de tiempo (horas, minutos y segundos) se definían como fracciones de la duración del día solar, esto es, del tiempo que tarda el sol en dos pasos sucesivos por el meridiano del lugar.

Los observatorios astronómicos encargados del servicio de conservación de la hora contaban con telescopios llamados de círculo meridiano, especialmente diseñados para determinar con gran precisión el momento del paso de un astro por el meridiano del lugar. El Observatorio estuvo encargado de mantener la hora oficial de España durante gran parte de su historia. Por ello, en esta sala, podemos ver una serie de relojes, los cuales datan desde 1790, el más antiguo, hasta la década de los 50 del pasado siglo XX.

El retraso o adelanto de estos relojes mecánicos, los más precisos de aquellos años, se determinaba comparándolos con la duración de la rotación de la Tierra, que se consideraba inmutable y se verificaba con el telescopio meridiano. Como dato curioso, cabe mencionar que desde aquí se enviaban dos señales eléctricas al relojero de la madrileña Puerta del Sol, una al mediodía y otra a medianoche, para que soltara la bola que marcaba esa referencia horaria. Además, durante varias décadas, el Observatorio proporcionaba un sistema de información horaria... ¡por teléfono! Hasta los años 60, se recibían cientos de llamadas cada día para preguntar qué hora era. En 1950 se compra un reloj eléctrico (Brillié) capaz de

enviar señales horarias a las emisoras de radio, con una línea telefónica directa con Radio Nacional.

En la década de 1960 se desarrollaron relojes atómicos más precisos que la rotación de la Tierra. Desde entonces, la hora oficial se mantiene con relojes atómicos y la unidad fundamental de tiempo, el segundo, se define en función de la frecuencia de oscilación del átomo de cesio. En 1970 se encomendó «la determinación, mantenimiento y difusión de las escalas de tiempo físico y astronómico, de acuerdo con los requisitos internacionales» al Instituto y Observatorio de la Marina de San Fernando en Cádiz.

Círculo meridiano. A.&G. Repsold, Hamburgo (Alemania), hacia 1853. Fue adquirido por los astrónomos del Real Observatorio de Madrid, J. Aguilar y E. Novella en 1854, convirtiéndose en el principal instrumento meridiano de este organismo, siendo utilizado desde aquella fecha hasta el último tercio del siglo XX.

El meridiano de Madrid y la navegación

Por paradójico que pueda parecer, el círculo meridiano ha jugado un papel esencial para la navegación. Aunque Madrid se encuentra lejos del mar, durante mucho tiempo el meridiano de referencia en España era el que pasaba por el Observatorio de Madrid, y desde aquí se confeccionaban los catálogos de estrellas que después utilizaban los marinos para orientarse en sus travesías. En concreto, el meridiano de Madrid pasaba por el centro del edificio de Villanueva, coincidiendo con la señal de nivelación situada inmediatamente debajo del punto de suspensión del péndulo, en la sala de la rotonda.

Si nos encontramos en alta mar y sin referencias visuales de la costa, hasta la invención del GPS, era necesario recurrir al Sol y las estrellas para orientarse. Deducir la latitud es relativamente fácil; podemos saber cómo de lejos estamos del ecuador gracias a un sextante: midiendo la elevación del Sol respecto al horizonte al mediodía. Sin embargo, no es nada fácil determinar la longitud terrestre (cuántos grados al este o al oeste nos hemos desplazado); por eso, muchos barcos no encontraban su destino, o incluso se perdían y sufrían graves accidentes.

En 1567, Felipe II ya había creado un suculento premio para quien pudiera resolver este problema (al que se llegó a presentar Galileo, con un método basado en las lunas de Júpiter, pero que dependía de la visibilidad de este planeta). Otros países imitaron a España.

El Observatorio y la bola de la Puerta del Sol

Desde 1856 y hasta principios del siglo XX, un cable telegráfico conectaba el Real Observatorio de Madrid con la Puerta del Sol, donde se dejaba caer cada día una gran bola que indicaba el momento del mediodía o medianoche, de forma que los ciudadanos pudieran sincronizar sus relojes. Como recuerdo de aquella costumbre, la bajada de la bola de la Puerta del Sol nos acompaña cada Nochevieja. Aun y todo, el sistema no parecía demasiado estable, y los astrónomos a menudo se quejaban de que el cable telegráfico estaba en mal estado y las señales no llegaban.

El Observatorio aparece varias veces en una de las novelas de Benito Pérez Galdós, *El doctor Centeno*. En concreto, en el siguiente pasaje se nos habla de esta medida del paso por el meridiano y su conexión con el reloj de la Puerta del Sol:

> «Ruiz, taciturno y atento sólo a su deber, hizo la observación del paso del Sol por el meridiano. No se verificó este acto sin cierta solemnidad como religiosa, con silencio, sosiego y aun algo de poesía, por cuya circunstancia y por ser operación diaria, decía Miquis que aquello era la misa astronómica. Cinco minutos antes del momento en que el péndulo sidéreo marcara el paso de Su Majestad, manipuló Ruiz en el telégrafo para subir la bola de la Puerta del Sol. Estuvo luego atento, callado, observando el mesurado latir del péndulo; preparó el anteojo con cristal opaco, se puso en el sillón, abrió las compuertas, miró. Una sección del globo inmenso entraba en el campo del objetivo, y su tangencia en los hilos de araña permitía determinar, por cálculo, el mediodía medio, por donde regulamos y medimos estas divisiones convencionales del tiempo, a las cuales acomodamos nuestro vivir. Luego manipuló otra vez para hacer caer la bola de la Puerta del Sol, y cerradas las compuertas y tapado el anteojo, registró los cronómetros y apuntó su observación en un cuaderno. Cienfuegos y Miquis, que habían visto esto muchas veces, permanecieron indiferentes, como los sacristanes ante los sagrados ritos. El uno leía un periódico, el otro se paseaba inquieto a lo largo de la sala.»

Benito Pérez Galdós: *El doctor Centeno*, 1883.

Detalle del Reloj de Gobernación en la Puerta del Sol de Madrid.

En 1714, Inglaterra creó un premio de 20.000 libras para quien consiguiera una precisión suficientemente alta. Y la solución vino de un relojero: John Harrison, que en 1775 construyó un reloj (H3, el original se conserva en Greenwich) que era suficientemente estable incluso en el mar, a pesar de todos los movimientos del barco, durante varias semanas. Así, se medía con ese reloj cuándo culminaba cierta estrella desde su posición en el mar, es decir, cuando alcanzaba una altura máxima. Comparando con la hora de paso de esa misma estrella por Madrid, tabulada en el catálogo que habían confeccionado los astrónomos del Real Observatorio, podían deducir la longitud. Por ejemplo, si la estrella Rígel culmina en Madrid a las doce de la noche, y desde el barco vemos que culmina a las dos de la madrugada, esto quiere decir que estamos dos horas de longitud geográfica desplazados hacia el oeste respecto a Madrid; es decir, 30 grados de longitud oeste. Combinando esta información con la latitud deducida con el sextante, podemos saber exactamente dónde nos encontramos.

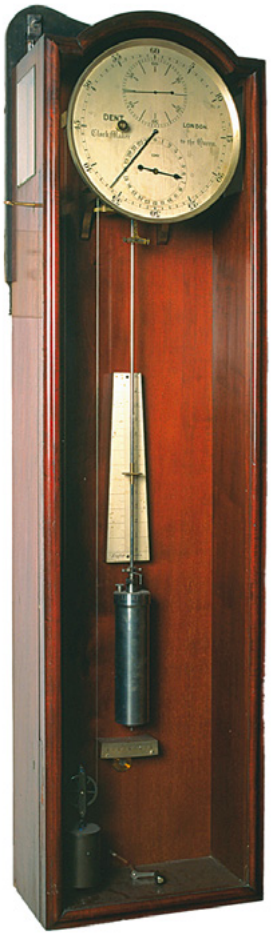
En resumen, el círculo meridiano del Real Observatorio de Madrid cumplía la misión fundamental de determinar con precisión la hora de paso (y elevación sobre el horizonte) del Sol y estrellas conocidas cada día del año. Como hemos visto, estas medidas tenían una doble aplicación: determinar la hora oficial y confeccionar detallados catálogos de estrellas que permitían a los marinos orientarse en sus travesías.

Cronómetro de marina. Dent, Londres. Hacia 1850. En la tapa interior figura un cartel con el certificado del fabricante, en el que hace alusión a su condición de proveedor de la Reina de Inglaterra y su Real Familia.

Sextante náutico. Oertling, Londres. Hacia 1850. Este instrumento permite medir ángulos entre dos puntos o un astro y el horizonte. Reemplazó al astrolabio por su mayor precisión y ha sido durante siglos de gran importacia en la navegación marítima. El nombre sextante proviene de la escala del instrumento, que abarca un ángulo de 60°, es decir, un sexto del círculo completo.

Los relojes del Observatorio

Desde su fundación, el Observatorio ha dedicado un gran esfuerzo a la medida del tiempo. Algunos de los relojes que se conservan en la sala del círculo meridiano fueron construidos a finales del siglo XVIII y fueron utilizados en las primeras décadas de existencia del Observatorio. Por ejemplo, podemos admirar dos reguladores astronómicos ingleses de esta época, que eran relojes de péndulo que proporcionaban una gran precisión. En los mejores casos, la variación en sus marchas era de tan solo un segundo mensual, y en ocasiones incluso menos. Los reguladores ingleses típicamente contaban con esferas independientes para indicar las horas, minutos y segundos, con el fin de evitar el rozamiento asociado a las agujas coaxiales. Uno de estos relojes fue construido hacia 1792 por Antonio Molina, pensionado en Londres por el gobierno español para especializarse en relojería con el fin de importar después dichos conocimientos a España.



Puesto que el periodo de un péndulo depende de su longitud, cualquier cambio de longitud por dilatación, por pequeño que sea, implica un cambio en el periodo y conlleva retrasos o adelantos. Los primeros reguladores astronómicos que adquirió el Observatorio contaban con un sistema de compensación térmica de tipo Harrison. El péndulo estaba formado por una parrilla en la que se alternaban varillas de metales de distinto coeficiente de dilatación, típicamente acero y latón. La extensión hacia abajo de las varillas en posición impar por dilatación se ve compensada por la extensión hacia arriba de las varillas en posición par, con un coeficiente de dilatación mayor. Esto ocurre porque las varillas están ancladas sucesivamente al puente inferior y superior y pueden deslizar libremente en el otro extremo, de forma que la dilatación de las varillas en posición par empuja hacia arriba el puente superior. Así, la longitud total del péndulo se mantiene prácticamente constante frente a variaciones de temperatura.

Regulador astronómico. Dent, Londres. Hacia 1850. En este reloj, todos los ejes de las ruedas giran sobre cojinetes de piedras duras y las bocas del áncora están fabricadas en zafiro y diamante. Se utilizó como péndulo magistral en el Observatorio y se encuentra en un estado impecable de conservación.

Uno de los relojes más importantes de la sala del círculo meridiano es el regulador astronómico Dent adquirido en 1854, precisamente el año en que se instala el telescopio meridiano. La marca Dent es toda una leyenda en el mundo de la relojería: se trataba de una dinastía de relojeros ingleses de gran prestigio, conocidos por haber construido el reloj del Big Ben de Londres. El regulador Dent de Madrid fue utilizado como péndulo fundamental para las medidas efectuadas con el círculo meridiano y los astrónomos de la época ya alababan su precisión: «es una de las mejores máquinas que pueden construirse y comparable con los más perfectos que poseen los grandes Observatorios de Europa» (Aguilar, Memoria de 1854-55).

A comienzos del siglo XX, se generalizó el uso de varillas de Invar, con un coeficiente de dilatación térmica tan pequeño que la longitud del péndulo prácticamente no cambiaba. En esta época se adquieren varios relojes de péndulo (reguladores astronómicos) de alta precisión de origen alemán que incorporan esta novedad y que proporcionaban una esmerada medida de la hora.

Con el paso del tiempo, se fueron desarrollando técnicas que proporcionaban una estabilidad incluso mayor a los relojes de péndulo. Por ejemplo, el regulador astronómico adquirido al fabricante francés Leroy hacia 1935 incorpora una campana hermética para mantener la presión constante; además, se guardaba en un sótano para mantener la temperatura constante, con una variación inferior a un grado. Desde la segunda mitad del siglo XIX, se habían popularizado también los reguladores eléctricos, en los que el impulso del péndulo lo proporciona un electroimán alimentado por una batería. Este es el caso de los reguladores astronómicos eléctricos Brillié y Leroy, datados hacia 1940, que contaban con este sistema eléctrico.

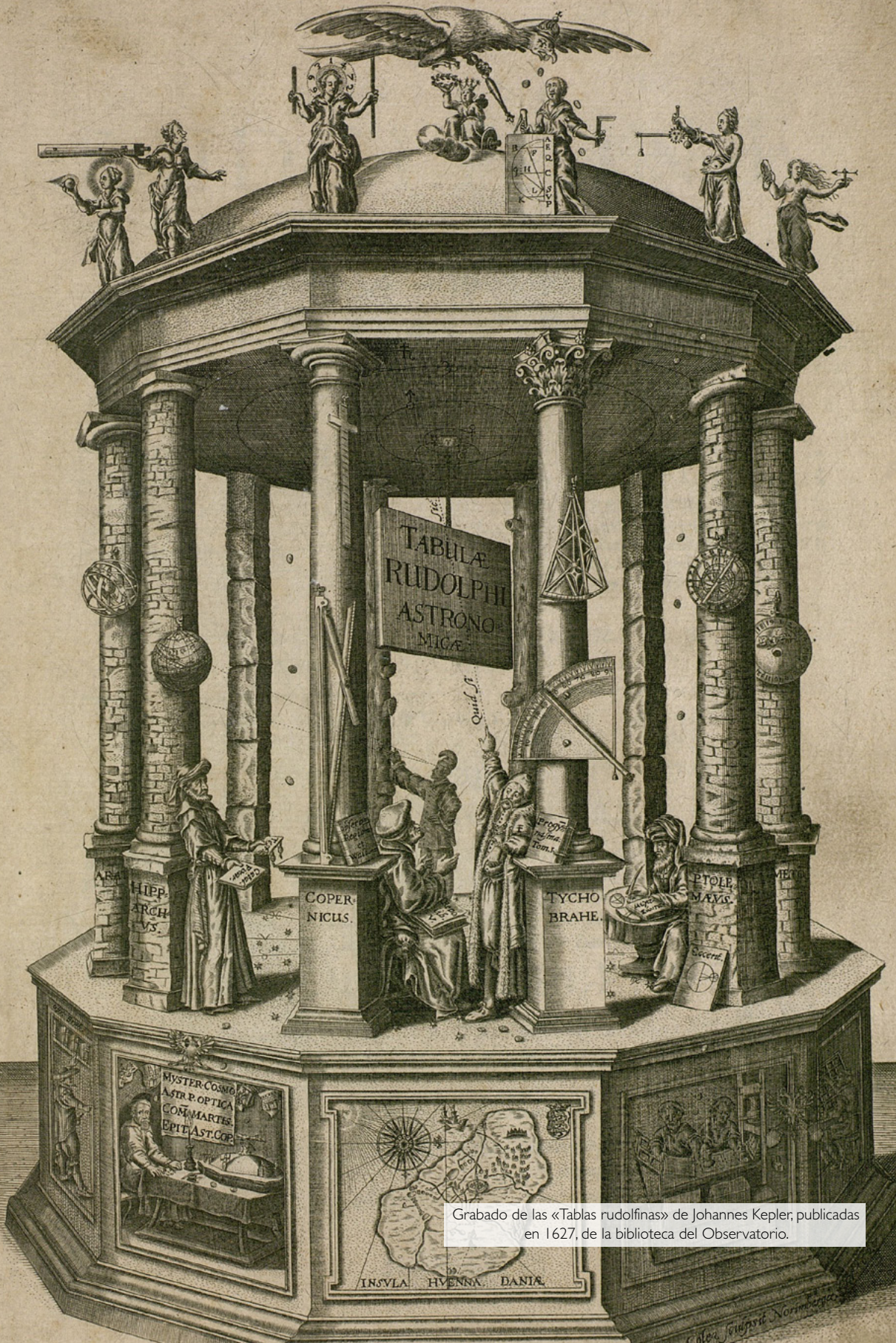
Reguladores astronómicos eléctricos. Hacia 1940. El de la izquierda, Brillié, fue adquirido como reloj patrón de tiempo medio de la hora oficial en España y ha estado funcionando hasta la década de 1970. El de la derecha, Leroy, es similar al anterior, con la diferencia de que este era el patrón de tiempo sidéreo. La hora coincidía exactamente en ambos relojes en el momento del equinoccio de primavera, para irse adelantando el de tiempo sidéreo respecto al anterior en unos 3 minutos y 56 segundos por día, para coincidir de nuevo en el equinoccio de otoño por ser la esfera de 12 horas.

Un cronógrafo de época

Este aparato consistía en un mecanismo que arrastraba a velocidad constante una cinta de papel. Un péndulo astronómico eléctrico enviaba una señal de forma que una de las plumas iba inscribiendo en la cinta una marca cada segundo. Por medio de la pulsación de un interruptor morse la segunda pluma inscribía el instante en el que ocurría un determinado evento físico percibido por el astrónomo. Midiendo sobre la cinta de papel la distancia de la señal con respecto a los segundos marcados, se podían apreciar fracciones de segundos, cosa que por observación visual de un cronómetro o péndulo resultaba imposible.

Anclado en el salón del círculo meridiano del Observatorio de Madrid, debió de ser el primer cronógrafo con el que contó dicho organismo, y jugó un papel importante en el registro de las horas de paso de los astros que se observaban.

Cronógrafo (hacia 1860).



Grabado de las «Tablas rudolfinas» de Johannes Kepler, publicadas en 1627, de la biblioteca del Observatorio.

LA BIBLIOTECA HISTÓRICA DEL OBSERVATORIO

La biblioteca

La Biblioteca se instaló en el ala oeste del edificio de Villanueva alrededor del año 1880. Para ello se cubrieron las paredes con estanterías, se instalaron dos escaleras de caracol para subir a la planta superior y se tapiaron sus ventanas (dos al sur y una al norte). Conserva una amplia colección de libros, revistas científicas y cuadernos de observación, aunque mucho se destruyó durante la guerra de la Independencia.

La biblioteca del Observatorio cuenta con unos 10.000 volúmenes. Aunque pueda parecer relativamente modesta, si pusiéramos todos los libros en línea, podríamos dar la vuelta completa a la pista de atletismo de un estadio olímpico (400 m). La biblioteca era lugar habitual de trabajo para los astrónomos; hoy en día, solo se utiliza de forma puntual para algunos trabajos históricos. En el Catálogo Colectivo del Patrimonio Bibliográfico, disponible en línea, pueden encontrarse todos los libros del Observatorio anteriores a 1958.

La biblioteca del Observatorio cuenta con un importante patrimonio bibliográfico que abarca más de medio milenio: desde un incunable, impreso en los albores de la era de la imprenta, hasta las últimas revistas especializadas impresas en papel y que en nuestra era de internet se ven sustituidas, cada vez más, por publicaciones exclusivamente electrónicas.

Biblioteca del Real Observatorio Astronómico de Madrid.

¿Qué es un incunable?

En la biblioteca histórica del Real Observatorio de Madrid se conserva un libro de 1499 llamado *De sphaera mundi* del astrónomo Johannes de Sacrobosco. El término incunable proviene del latín *incunabula*, 'en pañales', y se aplica esta expresión a los libros impresos desde la invención de la imprenta de Gutenberg, a mediados del siglo XV, hasta el año 1500. Por lo tanto, esta edición del libro de Sacrobosco es un incunable *in extremis*, al haber sido publicado en el penúltimo año que lo calificaría como tal.

La obra *De sphaera mundi*, originalmente escrita en el siglo XIII, recoge los conocimientos medievales sobre astronomía, heredados en gran medida del Almagesto de Ptolomeo e incorporando algunos elementos de la astronomía árabe. Así, se explica de una forma accesible, para los estudiantes universitarios de la época, el movimiento de las estrellas y planetas sobre la esfera celeste, así como las características de los eclipses.

Dos páginas de la obra *De sphaera mundi* de Sacrobosco (edición de 1499). Biblioteca del Real Observatorio de Madrid.

Un importante fondo bibliográfico

En toda actividad astronómica resulta de fundamental importancia el registro y catalogación de los movimientos celestes. Ya en el siglo XIII, el *scriptorium* de Alfonso X el Sabio confeccionó unas tablas astronómicas que se convirtieron en las mejores de su época, no superadas hasta varios siglos después. Entre los encargados de realizar las tablas destacaron Yehuda ibn Moshé e Isaac ibn Sid, intelectuales de origen judío y colaboradores directos del rey sabio. En la biblioteca atesoramos una magnífica edición de 1521 de las conocidas «Tablas alfonsíes», realizada en Venecia. A través de esta obra, el saber astronómico propio del mundo clásico, conservado y ampliado por los árabes, llegó al occidente medieval.

No fue hasta la creación de las «Tablas rudolfinas», más de tres siglos después, que se superó lo determinado por el rey sabio. El Observatorio conserva cuatro ediciones de esta obra firmada por el gran Johannes Kepler y publicada en 1627, años después de su composición. Kepler recoge principalmente los datos obtenidos por Tycho Brahe en sus cuidadas observaciones, y que serían clave para descubrir sus leyes del movimiento planetario. En las «Tablas rudolfinas», que reciben su nombre del emperador Rodolfo II (a quien fueron dedicadas), encontramos la posición de más de mil estrellas, así como los primeros factores correctores para la refracción atmosférica. Para muchos, se trata del mejor catálogo realizado en la era pretelescópica.

Kepler era un fiel seguidor de la teoría heliocéntrica de Copérnico, que mejoró gracias a su identificación de las órbitas planetarias como elipses en lugar de círculos. La obra capital de Copérnico *De revolutionibus orbium coelestium*, se conserva en la biblioteca en una edición de 1617. Nace así el sistema heliocéntrico, que considera el Sol en el centro del sistema solar. Por ello esta obra es considerada la iniciadora de la revolución científica. Uno de los más eminentes físicos de toda la historia y catalizador de la revolución científica, Isaac Newton, condensó las bases de la mecánica clásica en el *Philosophiae naturalis principia mathematica*, publicada inicialmente en 1687, y de la que el Observatorio cuenta con una tercera edición de 1726.

La biblioteca conserva algunas otras joyas bibliográficas. Por ejemplo, contamos con una edición de 1533 del *Libro de la Cosmografía*, de Pedro Apiano, uno de los grandes humanistas de su época, conocido por obras como el *Astronomicum Caesareum*.

PRIMA PARS

ORIENS

OCCIDENS

De partibus menſuræ, ſeu ſpeciebus
Geometriæ practicæ,
Caput XI.

Menſura eſt longitudo finita, quæ ignotam locorum diſtantiã ſenſibili experimento menſurat. Cuius partes ſeu famoſæ quantitates, quibus Geometer vtitur, ſunt: Granum hordei, Digitus, Vncia, Palmus, Dichas, Spithama, Pes, Seſquipes, Gradus, Paſſus ſimplex, Paſſus duplex quem Geometricum appellare libuit, Cubitus ſeu vlna, Pertica quem plures radium vocant, Stadium, Leuca, Miliare italicum, Miliare germanicum &c.

Página del *Libro de la Cosmografía*, de Pedro Apiano, en una edición de 1533. Biblioteca del Real Observatorio de Madrid.

En la misma línea, entre los fondos de la biblioteca destaca una bellísima edición de la *Geographiae* de Claudio Ptolomeo, en una edición de 1605. Esta singular obra es considerada el primer atlas de la historia, ya que fue compuesta en el siglo II d. C. Nuestra edición se encuentra en latín y griego, y fue preparada por Gerardus Mercator, el gran geógrafo de la Edad Moderna. También podemos mencionar la visionaria obra *Ars magna lucis et umbrae*, de Athanasius Kircher, que conservamos en una edición de 1646. Sus páginas abarcan un pormenorizado análisis de la luz, desde los relojes de sol y espejos, hasta el uso de luces y sombras en espectáculos, por lo que en ocasiones se considera a Kirchner un predecesor del cinematógrafo (gracias a lo que él llamó «linterna mágica»).

Ilustración de las constelaciones de Tauro y Orión del *Atlas céleste* de Flamsteed, publicado en 1776. Biblioteca del Real Observatorio de Madrid.

PARTE SEPTIMA. 233

DEMOSTRACION DEL ECLYPSE de la Luna.

El eclypſe del Sol ſe haze quando el Sol, y la Luna ſe juntan en la cabeça, o cola del dragon, y entôces como la Luna es cuerpo opaco, le pone entre el Sol, y la tierra, y con ſu cuerpo le cubre de manera, que priua al mundo de ſu luz, y lo dexa en ſombra: y tanto es mayor el eclypſe, y de mas cantidad, quanto mas llegados ſe hallan los luminares a la cabeça, o cola del dragon: y aſsi, que no puede ſer eclypſe de Luna, ſin ſer opoſicion, o Luna llena, ni eclypſe de Sol, ſin ſer conjuncion de Luna: empero como dicho es, ha de ſer eſtando en la cabeça, o cola del dragon, porque muchas vezes ſucederá conjuncion, y opoſicion, y no auer eclypſe, porque ni la Luna, ni el Sol eſtará en la cabeça, o cola del dragon; porque ſe ha de notar, que ay opoſicion que ſe dize perfecta, y imperfecta, y lo miſmo en la conjuncion perfecta, y imperfecta. Perfecta opoſicion es, quando ſe hallan el Sol, y la Luna opueſtos, eſtando el vno en la cabeça, y el otro en la cola del dragon, porque entonces eſtan opueſtos el Sol, y la Luna linealmente en tanto grado, que ſacada vna linea del vno al otro, paſſaria por el centro del mundo, y en eſta opoſicion de neceſſidad ha de auer eclypſe de Luna.

Opoſicion imperfecta ſe dize, quando la Luna diſta del Sol la mitad de la eſfera, que ſon ciento y ochenta grados, mas no que eſtè la Luna en la eclyptica, cabeça, o cola del dragon, ſino en latitud Septentrional, o Meridional del Zodiaco en el cuerpo del dragon, la qual ſe haze cada mes lunar, ſin que aya eclypſe en ella.

Eclypſe del Sol.

Luna cubre la luz del Sol.

Demoſtracion del eclypſe del Sol.

Opoſicion perfecta.

Opoſicion imperfecta.

Conjun-

Página de la obra *Imagen del mundo sobre la esfera*, de Lorenço Ferrer Maldonado, publicada en 1626. Biblioteca del Real Observatorio de Madrid.

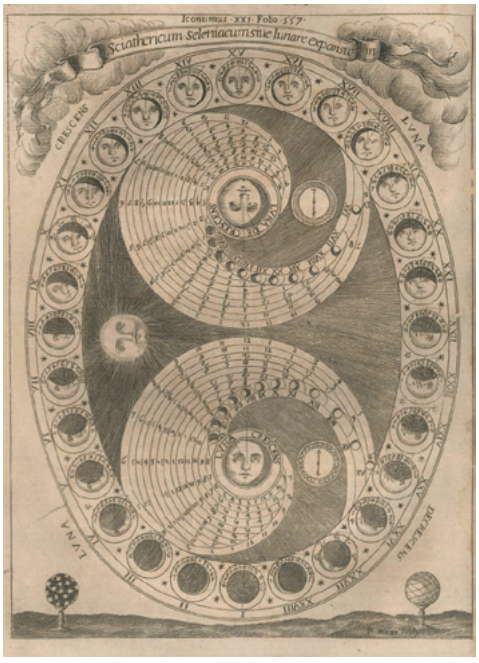


Ilustración de la obra *Ars magna lucis et umbrae*, de Athanasius Kircher, en una edición de 1646. Biblioteca del Real Observatorio de Madrid.

La primera medida precisa de la gravedad

La biblioteca histórica del Real Observatorio de Madrid es un lugar de referencia en geofísica, ya que aquí se llevó a cabo la primera medida precisa de la aceleración de la gravedad en España. En ausencia de rozamiento con el aire, cualquier cuerpo en caída libre incrementa su velocidad a una tasa de 9,8 metros por segundo cada segundo, el famoso valor de g = 9,8 m/s^2. Esta medida la llevó a cabo el geodesta Joaquín Barraquer y Rovira entre 1882 y 1883. Utilizó para ello varios péndulos reversibles colocados sobre un pilar que estaba cimentado independiente al resto del edificio de Villanueva. Gracias a ello, se obtuvo el primer valor absoluto de la gravedad en Madrid con tan solo un error de ± 1,6 miligales, lo cual le valió a Joaquín Barraquer un gran reconocimiento internacional.

Aún hoy en día se sigue acudiendo al lugar para hacer ahí algunas mediciones con aparatos mucho más modernos. Hoy en día contamos con gravímetros absolutos que consisten fundamentalmente en una cámara de vacío en la que se deja caer una bola y, mediante un sistema de láseres, se determina el momento preciso de paso a distintas alturas; ajustando una parábola, puede deducirse el valor de g con una precisión de muchos decimales. Así se realiza el calibrado de gravímetros y pueden determinarse pequeñas variaciones en el valor de g a lo largo del tiempo.

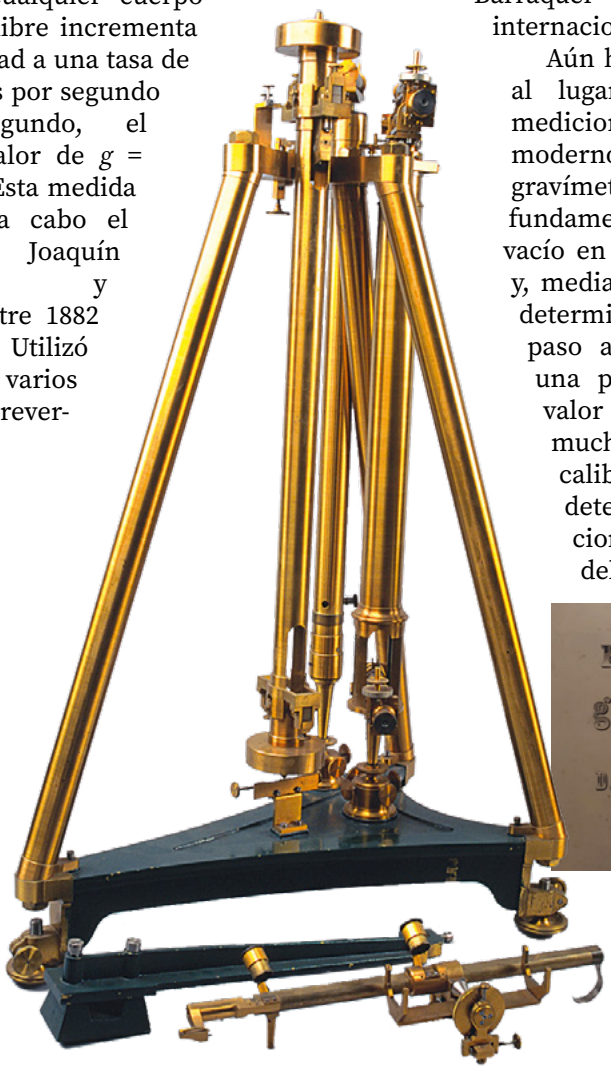


Imagen del péndulo doble de inversión utilizado por Joaquín Barraquer en la biblioteca del Observatorio y placa que conmemora aquella medida.

PABELLÓN DE HERSCHEL

Cuadrante destinado a la medida de la altura del astro respecto del horizonte, en la réplica del Gran Telescopio de Herschel.

EL GRAN TELESCOPIO DE HERSCHEL

El pabellón

Este pabellón, inaugurado en 2004, exhibe la reconstrucción a escala original del gran telescopio de William Herschel. Los telescopios de Herschel fueron los primeros grandes telescopios de la historia y el que construyó para Madrid era uno de los mejores telescopios del mundo. El afán por construir telescopios cada vez mayores venía motivado por la mayor nitidez con la que podían observarse los astros, posibilitando así realizar nuevos descubrimientos. Comenzamos esta sección repasando brevemente la vida y aportaciones de los hermanos Herschel, William y Caroline, para centrarnos después en el gran telescopio de Madrid y la réplica con la que contamos en nuestras instalaciones.

Pabellón que alberga la reproducción del gran telescopio de Herschel, obra de Antonio Fernández Alba.

William Herschel, eminente astrónomo

Friedrich Wilhelm Herschel nació en Hannover, Alemania, en 1738. A los 19 años emigró a Inglaterra junto a su hermano; ahí dejó de usar su nombre alemán y pasó a usar el nombre de William, con el que lo recordamos. Aunque era músico de formación, a los 35 años leyó su primer libro de astronomía y de esta manera se empezó a interesar por esta ciencia. Entre sus hitos astronómicos está el privilegio de descubrir el planeta Urano en 1781 utilizando uno de los telescopios creados por él mismo. Con el tiempo, este aficionado se convertiría en uno de los mayores astrónomos de todos los tiempos.

Es llamativo y un tanto irónico que hasta los 35 años William Herschel creyera que no iba a ser recordado como astrónomo, sino como músico. En efecto, William hizo una buena carrera musical: tocaba el violín, el clave, el oboe, el órgano, dirigía e incluso componía sinfonías. Obtuvo un puesto prestigioso como organista en Bath, una ciudad de gran relevancia cultural en aquella época.

El descubrimiento de Urano lo hizo mundialmente famoso y el rey Jorge III inventó un nuevo título para él: King's Astronomer (distinto de Astronomer Royal, cargo que estaba ocupado); en su honor, Herschel llamó al nuevo planeta Georgium Sidus, la estrella de Jorge. El rey Jorge III pidió a William que se instalara cerca de su palacio en Windsor, y así lo hizo, pudiendo ilustrar al rey y a sus invitados con espectáculos astronómicos. El nombre de Georgium Sidus para el nuevo planeta estuvo utilizándose en algunos lugares, sobre todo Inglaterra, durante unos 40 años, pero finalmente se impuso la propuesta del astrónomo Johann Elert Bode de llamarlo Urano. Así se seguía la genealogía de la mitología clásica, ya que Urano era el padre de Saturno, que a su vez era el padre de Júpiter.

Sir William Herschel, retratado por Lemuel Francis Abott en 1785.

Además de descubrir Urano y sus dos lunas principales, William hizo importantes contribuciones sobre estrellas binarias y su gravedad. También catalogó, con ayuda de su hermana Caroline, unas 2500 nebulosas, llegando a la conclusión de que no son muchas estrellas juntas, sino objetos verdaderamente difusos. Una de sus aportaciones más importantes fue confeccionar el primer mapa de la estructura de nuestra galaxia, la Vía Láctea, contando el número de estrellas por unidad de área en distintas direcciones del cielo.

Por si lo anterior fuera poco, William Herschel también descubrió en 1800 lo que él llamó «rayos caloríficos», una misteriosa radiación invisible procedente del Sol que, descompuesta su luz en colores con la ayuda de un prisma en una habitación a oscuras, calentaba los termómetros situados más allá del color rojo en el que termina la parte visible del espectro. Es lo que hoy conocemos como radiación infrarroja. Se revelaba así que nuestros sentidos son sensibles solo a una estrecha ventana de lo que hoy llamamos espectro electromagnético, un hallazgo vital para toda la ciencia posterior.

Retrato de Caroline Herschel (Melchior Gommar Tieleman, 1829).

Caroline Herschel, la primera astrónoma profesional de la historia

William y su hermana Caroline estuvieron muy unidos a lo largo de toda su vida. Ambos eran de Hannover pero acabaron pasando la mayor parte de su vida en Inglaterra. Inicialmente, los dos se dedicaban a la música: ella era soprano y llegó a interpretar un papel de solista en el Mesías de Händel dirigido por su hermano William.

Cuando William se empezó a interesar seriamente por la astronomía, ella le ayudaba como asistente. En 1783, William le construyó un telescopio para que ella pudiera hacer sus propias observaciones. Caroline saltó a la fama cuando descubrió un cometa. Fue el primero de toda una serie: a lo largo de su vida llegó a descubrir un total de ocho cometas. El rey Jorge III le otorgó un sueldo anual por sus labores astronómicas y de apoyo a William; por lo tanto, es considerada la primera astrónoma profesional de la historia.

Caroline fue la primera mujer en publicar artículos científicos en las Philosophical Transactions de la Royal Society. En 1828, la Royal Astronomical Society le otorgó la medalla de oro por su trabajo, y fue elegida miembro honorario de dicha sociedad.

Caroline vivió 97 años (sobrevivió 26 años a su hermano William). Fue una mujer tremendamente ordenada y sistemática, lo que fue de gran ayuda para catalogar correctamente las observaciones que realizaban. Así, fue la encargada de compilar la mayoría de los catálogos astronómicos que observó junto a William. Por desgracia, quemó una gran parte de sus diarios, lo cual hace que no podamos documentar con detalle algunas épocas de su vida.

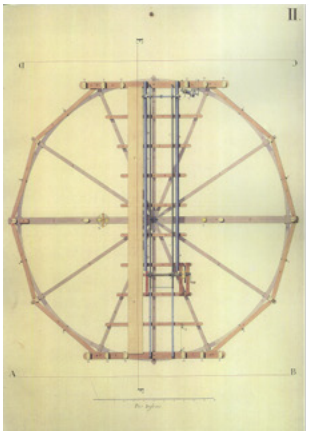
Un gran telescopio con una historia breve

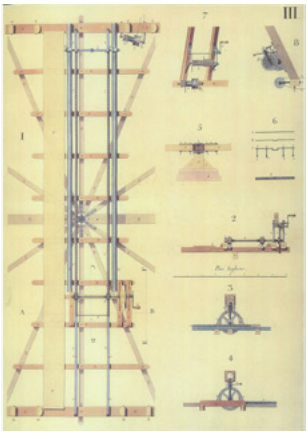
La Corte española encargó a Herschel en 1796 la construcción de un telescopio de reflexión dotado de un espejo de 2 pies de diámetro (60 cm) situado en la parte posterior de un tubo de hierro batido de 25 pies de distancia focal (unos 8 metros). La montura del telescopio se construyó en un astillero inglés, finalizándose en 1798. Tras su montaje, pruebas de funcionamiento y mejoras realizadas por el propio Herschel, el telescopio fue embarcado en Londres a principios de 1802 y llegó a Madrid, donde se eligió un emplazamiento adecuado en el Observatorio. La primera observación astronómica documentada tuvo lugar el 18 de agosto de 1804. Este telescopio llegó a ser el segundo más grande de Europa y uno de los mejores de los construidos por Herschel.

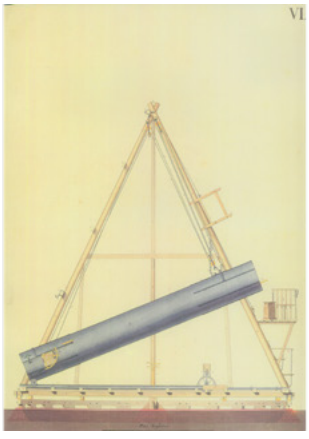
Con el telescopio de 25 pies (~ 8 m), Herschel alcanzó su límite de capacidad: llegó a construir uno de 40 pies (~ 12 m), pero no mejoraba significativamente la calidad de los resultados. Las dificultades técnicas del fundido y pulido hacían que la calidad del telescopio disminuyera notablemente al sobrepasar los dos pies (~ 60 cm) de abertura. Hubo que esperar medio siglo hasta que Lord Rosse pudiera construir un telescopio eficiente de seis pies (~ 1,8 m) de diámetro.

William Herschel nunca llegó a pisar Madrid. La gestión del contrato del telescopio, el control de su construcción, los planos de montaje y el envío a España corrió a cargo de José de Mendoza y Ríos, un ilustre marino afincado en Inglaterra. Tras negociar varios tamaños, se acordó comprar un gran telescopio de 25 pies de distancia focal y otros dos más pequeños, de 7 pies (~ 2,1 m) cada uno, que hemos mencionado en el capítulo del edificio de Villanueva. Se pagó un total de 11.000 libras por esta adquisición, lo que actualmente equivaldría a más de un millón de euros.

El envío desde Londres hasta el puerto de Bilbao se llevó a cabo a bordo del bergantín Juana. En Bilbao lo recogió Carlos Rodríguez, Instrumentista Jefe del Taller del Observatorio, pero, por desgracia, sufrió un importante accidente en el camino a Madrid (a la altura de la Peña Orduña, recibió la coz de una mula y acabó muriendo como



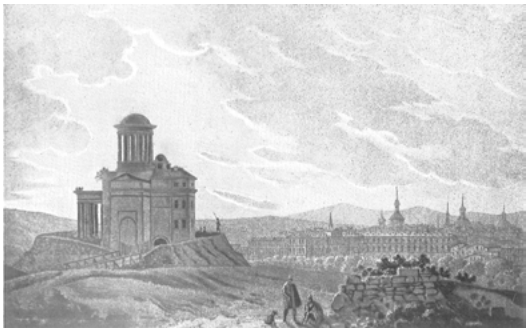




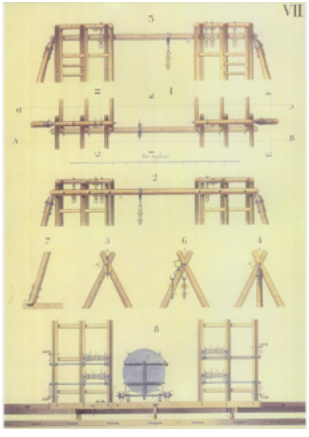
consecuencia de las lesiones). Su hijo, Lope Rodríguez, fue enviado a buscar los carros.

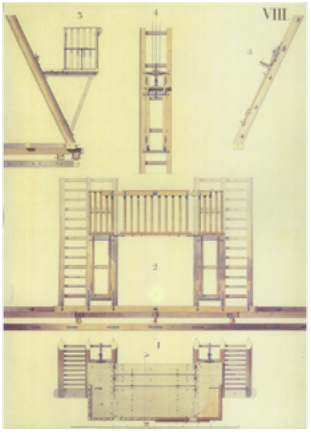
A falta del experto Carlos Rodríguez, se tardó varios años en poner en marcha el telescopio. Como hemos mencionado, las primeras observaciones de las que tenemos constancia datan de 1804, pero en 1808 se produce la llegada de las tropas napoleónicas, que escogieron este lugar por su estratégico emplazamiento para llevar a cabo maniobras militares. Al intuir el peligro que la llegada de los franceses suponía para los telescopios, los astrónomos de la época escondieron fuera del Observatorio algunas de las piezas más importantes, como los espejos originales del gran telescopio de Herschel y sus planos. El tubo y el armazón de madera quedaron en el Observatorio, dada la dificultad para transportarlos, y fueron destruidos por las tropas francesas. La conservación de la documentación de José de Mendoza, con los planos y un texto minucioso que los acompañaba, ha hecho posible la reconstrucción fidedigna del telescopio que podemos admirar hoy.

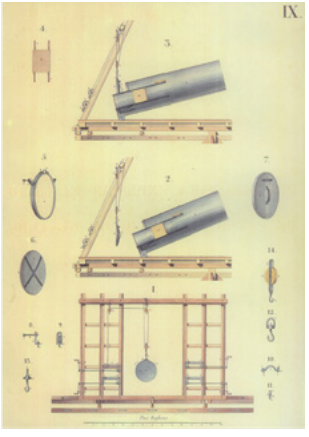
José Mendoza y Ríos. Redactó las instrucciones para el montaje, uso y envío a España del telescopio de 25 pies.



El Observatorio utilizado como polvorín durante la invasión francesa, según grabado publicado por Bacler d'Albe en *Souvenirs Pittoresques-Campagne d'Espagne*.







Algunas de las láminas del gran telescopio de Herschel confeccionadas por José de Mendoza y Ríos y que servían como instrucciones de montaje.

¿Cómo funcionaba el gran telescopio de Herschel?

El gran telescopio de Herschel es un reflector, en el que el espejo ligeramente cóncavo situado en al fondo del tubo hace que la luz se refleje hacia la parte superior, convergiendo los rayos en el punto que llamamos foco. El espejo principal del telescopio se encuentra ligeramente inclinado con respecto al eje del tubo y desplazado respecto de su centro. Esto hace que los rayos se concentren no en el eje del tubo, sino en un lateral de la boca del telescopio, por donde observaba el astrónomo con una pequeña lente (el ocular). Esta configuración evita la pérdida de luminosidad que supondría utilizar más espejos, como en el esquema clásico del telescopio newtoniano. Esta ingeniosa estrategia introducida por William Herschel hace que conozcamos a este tipo de telescopios como *herschelianos*.

Aunque hoy en día nos pueda resultar llamativo, el gran telescopio de Herschel estaba colocado en el jardín, a la intemperie, sin ningún edificio o cúpula que lo protegiera. En Inglaterra, el propio Herschel situaba sus grandes telescopios al aire libre, tal y como podemos ver en las ilustraciones de la época. Por eso, el telescopio cuenta con una tapa (en la ilustración, colgada de la barandilla del balcón de observación) para poder tapar la boca del tubo cuando no se observaba, y evitar así que el interior del telescopio (sobre todo, el espejo) se deteriorara con la lluvia.

Mover el telescopio suponía todo un reto. Para desplazar el telescopio horizontalmente (en azimut) era necesario girar toda la estructura de madera, que para ello va montada sobre unos rodamientos. Para cambiar la elevación, se utilizaba un sistema de poleas y cremallera. Simultáneamente, era necesario cambiar la elevación del balcón desde el cual observaba el astrónomo.

Dada la dificultad de mover toda la estructura de madera para apuntar a diferentes direcciones del cielo, la estrategia más eficiente era dejar el telescopio apuntando a una cierta dirección (generalmente en el meridiano), durante toda una noche. El observador, subido en el balcón, miraba con el ocular cómo desfilaba el cielo por delante de su campo visual. La siguiente noche despejada observaba otra franja situando el tubo con una elevación ligeramente diferente. De esta manera y mediante sucesivos «barridos», se consigue explorar todo el cielo visible desde el emplazamiento.

Sistema de poleas para el movimiento vertical del telescopio y el balcón de observación.

Un ascensor VIP

Para observar con los grandes telescopios de Herschel, como el de Madrid, el astrónomo tenía que trepar hasta una plataforma de observación y mirar hacia el interior del tubo utilizando el ocular. Así, paradójicamente, el astrónomo se situaba de espaldas al objeto que estaba observando.

La estructura de madera que soporta el telescopio de Madrid está dotada de una silla con poleas para subir cómodamente a la plataforma de observación: una especie de ascensor de la época. Podemos pensar que estaría destinada, además de al astrónomo, a las personas importantes y autoridades que quisieran mirar por el telescopio, para evitar que tuvieran que trepar por los empinados peldaños de madera. En el caso de Herschel, sabemos que el mismísimo rey a menudo pedía mirar por sus telescopios o llevaba ahí a sus invitados. En Madrid, al parecer, Carlos IV quiso ser el primero en mirar por el gran telescopio recién adquirido, aunque no hay constancia de si esto finalmente llegó a ocurrir.

Detalle del «ascensor» para acceder a la plataforma de observación del gran telescopio que Herschel construyó para Madrid.

Una réplica única en el mundo

El telescopio apenas pudo ser empleado para la observación astronómica, ya que tan solo cuatro años después de su llegada a Madrid comenzó la invasión napoleónica. Los soldados franceses no solo emplearon el cerro como punto de interés estratégico durante la ocupación de la capital, sino que aprovecharon la reciente adquisición con fines bélicos. El hierro del tubo del telescopio fue fundido para producir munición y se utilizó la madera de la montura para hacer fuego y calentarse.

Por suerte, los astrónomos de la época pudieron salvar los espejos de bronce pulidos por Herschel y las láminas originales de su construcción. Los espejos originales los conservamos en el edificio de Villanueva, tal y como ya hemos señalado. Gracias al buen estado de las láminas ha sido posible llevar a cabo la reconstrucción del telescopio. Algunas copias de estas láminas están expuestas en las esquinas de este pabellón.

Fue una tarea laboriosa encontrar una empresa que pudiera ejecutar correctamente la reconstrucción del telescopio de Herschel. Finalmente, aceptó el encargo una empresa de astilleros de Bermeo (Vizcaya), especializada en construir barcos de madera. En el año 2004, la réplica del telescopio se encontraba ya instalada en el pabellón diseñado por Antonio Fernández Alba. El telescopio cuenta además con todos los elementos ópticos, incluidos detalles como los telescopios buscadores y el cuadrante de latón que permite determinar la elevación a la que se observa. Estamos ante una pieza única en el mundo, en la que al interés científico e histórico se une la impresionante belleza de sus formas, colores y materiales.

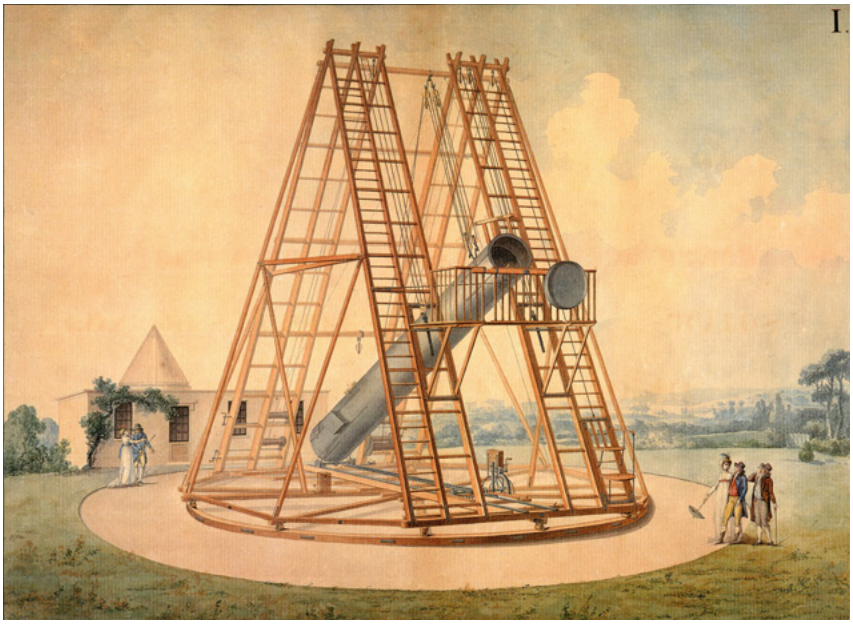
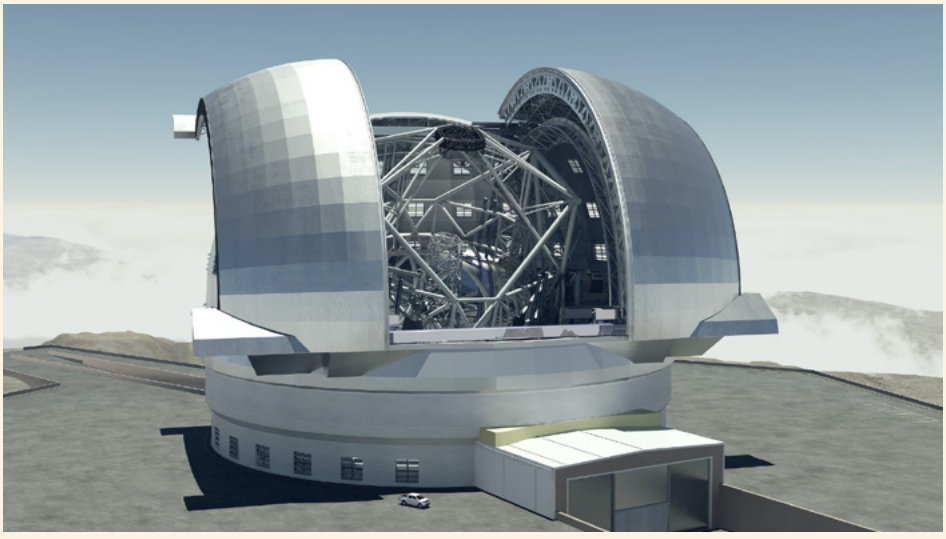


Ilustración de la época que muestra el gran telescopio de Herschel durante sus pruebas en Inglaterra antes de ser enviado a Madrid.

¿Cuál es el telescopio más grande del mundo?

Actualmente, el telescopio de luz visible más grande del mundo es el Gran Telescopio Canarias, situado en la isla de La Palma. Cuenta con un espejo primario de 10,4 m de diámetro. En efecto, la mayoría de telescopios profesionales modernos son de tipo reflector, al igual que los telescopios de Herschel, pero divididos en segmentos, típicamente hexagonales, que encajan como en un puzle.

Además, en estos momentos, un telescopio notablemente más grande se encuentra en construcción en el desierto de Atacama, en Chile: contará con un espejo primario de 39 metros de diámetro. Conocido como ELT (por sus siglas en inglés, *Extremely Large Telescope*) es el proyecto más ambicioso del Observatorio Europeo Austral, del cual España forma parte.



Recreación del que pronto será el mayor telescopio del mundo, el ELT, en el desierto de Atacama (Chile).

SALA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DEL UNIVERSO

Sala de Ciencias
de la Tierra
y del Universo

Libretas con dibujos y anotaciones de manchas y protuberancias solares y planetas.

ASTRONOMÍA

La más antigua de las ciencias

A menudo se argumenta que la astronomía es la más antigua de todas las ciencias, con intentos sistemáticos de catalogar los cielos llevados a cabo por nuestros ancestros varios milenios antes de nuestra era. El interés por la astronomía fue la principal motivación para construir un observatorio en Madrid a finales del siglo XVIII. Además de dotar al Observatorio de un magnífico edificio y de algunos de los mejores telescopios de la época, se diseñó un plan integral que incluía misiones internacionales para formar a los emergentes astrónomos.

Así, el que sería primer director del Observatorio, el abate Salvador Jiménez Coronado, estuvo becado en París durante varios años, y dos jóvenes astrónomos, Carlos Rodríguez y Mario Fernández, realizaron una estancia prolongada en Londres con el fin de aprender las técnicas necesarias para crear instrumentos científicos. Se procuraba que el Observatorio fuera lo más autosuficiente posible, también en lo que respecta a la construcción de telescopios e instrumentos. Como fruto de esta suerte de programa Erasmus de la época, Carlos Rodríguez y Mario Fernández hicieron llegar a España un elegante telescopio gregoriano creado en Londres hacia 1790, coincidiendo con la fundación del Observatorio, y que conservamos en nuestro museo. Se trata de un telescopio portátil de latón que cuenta con dos espejos cóncavos, uno de ellos perforado, de forma que el observador se sitúa detrás del espejo primario (a diferencia de los telescopios reflectores newtonianos, donde el observador miraba desde un lateral del tubo).

Telescopio gregoriano fabricado por Carlos Rodríguez y Mario Fernández en Londres hacia 1790.

Al regresar a Madrid en 1794, Carlos Rodríguez pasó a ser jefe del recién fundado taller de instrumentos del Observatorio, que contaba con una escuela especializada donde se formaba a un puñado de aprendices instrumentistas. De este taller saldrían dos globos, uno celeste y otro terrestre, que el director del Observatorio regaló al rey Carlos IV, con el fin de que "el Príncipe de Asturias y los Infantes estudiasen (...) los diferentes movimientos de los astros".

Del Taller de Instrumentos salieron también dos magníficas esferas armilares. Una de ellas sigue el sistema geocéntrico de Ptolomeo, en el que la Tierra no tiene movimiento alguno, sino que es el centro de nuestro universo, y las estrellas y planetas giran a su alrededor. La segunda esfera armilar representa la teoría heliocéntrica presentada por Nicolás Copérnico en 1543, según la cual el Sol está inmóvil en el centro del sistema solar y los planetas giran a su alrededor, tal y como realmente ocurre.

En el cielo hay una gran variedad de astros y, por ello, se han construido a lo largo de la historia diferentes instrumentos para su observación y estudio. De entre todos ellos, en la sala destaca un buscador de cometas que fue utilizado para la observación de cuerpos extensos de débil luminosidad como las nebulosas y los cometas. Se trata de un elegante instrumento de 87 cm construido sobre caoba y latón a mediados del siglo XIX. La característica que lo define es que posee anteojos de gran abertura, corta distancia focal y poco aumento, de forma que permitía identificar objetos tenues.

A principios del siglo XX, se dio una circunstancia astronómica muy especial para nuestro país. En 1900 iba a producirse un eclipse de Sol visible como total desde la Península; durante algo más de un minuto, el Sol se iba a oscurecer por completo,

Esfera armilar geocéntrica creada en el taller de instrumentos del Observatorio a finales del siglo XVIII. Dispone de ocho armillas que corresponden al meridiano, Luna, Mercurio, Venus, Sol, Marte, Júpiter, Saturno, y en el plano de la eclíptica una franja zodiacal.

Buscador de cometas. Utzschneider y Fraunhofer, Múnich. Hacia 1850.

mostrando su majestuosa corona. Pero, por si fuera poco, a ese evento iba a seguirle un segundo eclipse en 1905 y un tercero en 1912, los tres visibles como totales desde nuestro territorio (el último de ellos fue híbrido, con una fase de totalidad extremadamente breve, de tan solo 2 segundos). Esta circunstancia única sirvió para dar un fuerte impulso al estudio del Sol desde el Observatorio y se consiguió financiación para adquirir un gran telescopio manufacturado por Grubb en Irlanda en el año 1900.

El anteojo ecuatorial de Grubb cuenta con los avances tecnológicos disponibles en los albores del siglo XX. Consta de tres tubos paralelos, uno de ellos para tomar fotografías del cielo, otro para hacer observaciones visuales y un tercero para acoplar un espectrógrafo, con un prisma que descompone la luz en los colores del arcoíris. Si la estrella que estamos observando contiene un elemento químico que absorbe luz en el naranja, veremos una raya negra justamente sobre ese color; si, en cambio, la estrella contiene un elemento que absorbe luz en el verde, aparecerá una línea oscura sobre el verde. Analizando este enjambre de líneas, esa especie de código de barras que los astrónomos conocemos como espectro, podemos deducir cuáles son las propiedades físicas y químicas del objeto que estamos estudiando. Además, el telescopio dispone de un mecanismo de relojería situado en el interior de la montura que puede mover el anteojo para hacer un seguimiento continuo del astro (compensando el movimiento de rotación de la Tierra); esto permite realizar fotografías con grandes tiempos de exposición.

Imagen del eclipse total de Sol del 28 de mayo de 1900, captada por los astrónomos desplazados a Plasencia.

El anteojo ecuatorial de Grubb, Dublín. Hacia 1900.

Fragmento del *mapa mundi* de la obra «Tablas rudolfinas» de Johannes Kepler, publicadas en 1627, que se conserva en la biblioteca del Observatorio.

GEODESIA Y CARTOGRAFÍA

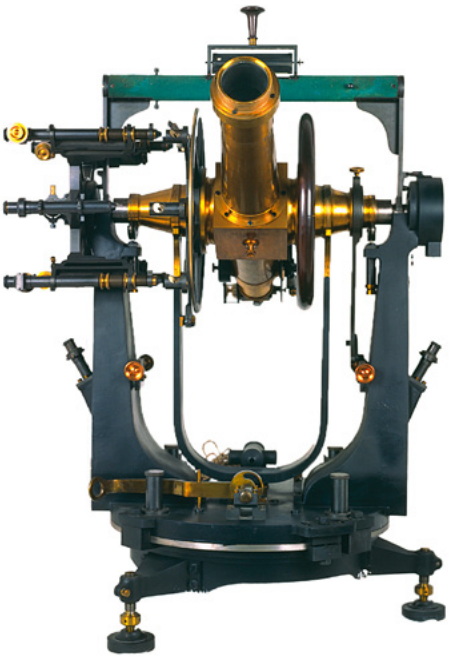
Geodesia: cómo medir la forma de la Tierra

Podríamos considerar a Eratóstenes el padre de la geodesia, con su ingenioso experimento para determinar las dimensiones de la Tierra en el siglo III a.C. Midiendo la longitud de la sombra proyectada por un obelisco en Alejandría el día en que el Sol llegaba al fondo de un pozo en Asuán, pudo determinar cuál era el radio de nuestro planeta. En ese instante, los rayos solares inciden perpendicularmente en Asuán, mientras que forman un cierto ángulo –que Eratóstenes midió correctamente– con la superficie terrestre en Alejandría, como consecuencia de la curvatura de la Tierra. Y es que, para conocer la forma de nuestro planeta, a menudo tenemos que recurrir al Sol y las estrellas. En efecto, la astronomía ha servido durante mucho tiempo como ciencia auxiliar a la geodesia, que se encarga de determinar la forma precisa de la Tierra y la distancia entre puntos conocidos, lo cual es fundamental para el posterior desarrollo de la cartografía.

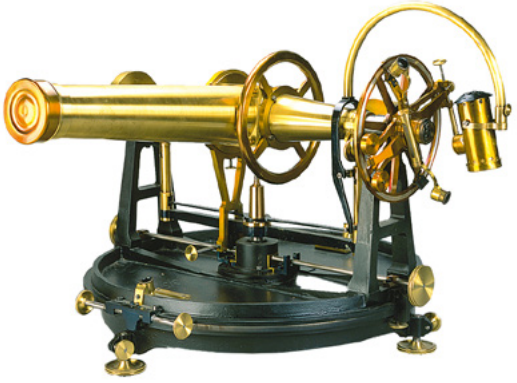
Medida por Eratóstenes del tamaño de la Tierra, tal como aparece ilustrada en el libro *Ars magna lucis et umbrae* de Athanasius Kircher de la biblioteca del Observatorio en una edición de 1646.

Nuestro museo alberga varios instrumentos de geodesia que han jugado un papel clave para establecer una malla de puntos (una red geodésica) sobre la que poder construir el mapa topográfico nacional. Entre estos instrumentos destacan los círculos meridianos portátiles, como el de Salmoiraghi, de 1900. Su funcionamiento es esencialmente el mismo que el círculo meridiano que presentamos al adentrarnos en el edificio de Villanueva, con la diferencia de que podía desplazarse a distintos lugares. Era un instrumento pesado; por eso, para facilitar su desplazamiento, podía desmontarse en piezas más pequeñas. Su eje transversal debía orientarse según la dirección este-oeste, de forma que el anteojo apuntara exactamente a lo largo de la línea norte-sur, el meridiano local. Estos aparatos disponían de un limbo graduado para la medida de ángulos verticales, de donde podía deducirse la latitud geográfica del lugar. Además, comparando la hora de paso de astros conocidos con un meridiano de referencia, podía deducirse la diferencia de longitud geográfica respecto al punto de referencia.

Con aparatos como los círculos meridianos portátiles era posible determinar las coordenadas geográficas de vértices geodésicos de especial relevancia. Sin embargo, si nuestro objetivo es realizar una buena representación cartográfica del terreno, lo que nos interesa es disponer de una malla de puntos cuyas separaciones y ángulos se encuentran bien determinados. Eso es lo que conocemos como una red geodésica.



Círculo meridiano portátil de Salmoiraghi, hacia 1900. Este instrumento dispone de un mecanismo para inversión del anteojo sobre las muñoneras.



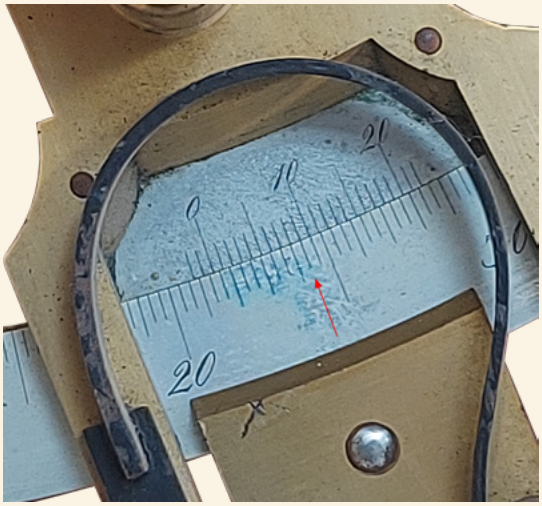
Anteojo de pasos de A. Repsold & Söhne. Hamburgo (Alemania), 1868. Este aparato figuró en una exposición realizada en Madrid en el año 1874. En la ficha de este instrumento inserta en el catálogo de dicha exposición se dice: «Con él se han determinado las latitudes y longitudes geográficas de varias capitales de provincia».

¿Qué es un vernier o nonius?

El vernier es un ingenioso sistema que, superponiendo una segunda escala a una cierta regla graduada, permite aumentar la precisión de dicha medida, obteniendo una cifra decimal más. Es habitual en instrumentos como calibres y en los limbos graduados de telescopios o teodolitos.

En una cierta escala de medida, como la de un calibre, podemos apreciar hasta la división más pequeña (por ejemplo, un milímetro). El vernier se basa en una especie de «truco» que nos permite apreciar divisiones aún más pequeñas (por ejemplo, una décima de milímetro) mediante la superposición de una segunda escala que, partiendo de un tramo de la regla que contenga N divisiones, lo divide en N+1 divisiones.

Siguiendo con el ejemplo del calibre, si en la regla principal cada centímetro está dividido en diez unidades de un milímetro, en el nonius, ese mismo centímetro estará dividido en once unidades equiespaciadas. Así, cuando el origen del vernier se desplaza hasta la medida que queremos realizar (por ejemplo, siete milímetros), la marca del vernier que coincida con la siguiente división entera de la regla principal nos dará la lectura de la siguiente posición decimal, en este caso la décima de milímetro. Así, el vernier actúa como un multiplicador que nos permite apreciar divisiones inferiores a la unidad de medida de nuestro instrumento.



Ejemplo del vernier del clisímetro expuesto en la rotonda central del edificio de Villanueva:

Si no dispusiéramos de vernier, realizaríamos la lectura sobre la línea del 0, obteniendo un resultado de 21° y una estimación entre 20' y 40'.

Con el vernier, buscamos la línea coincidente (9) y el resultado sería 21° 29'.

La sensibilidad del vernier viene determinada por:

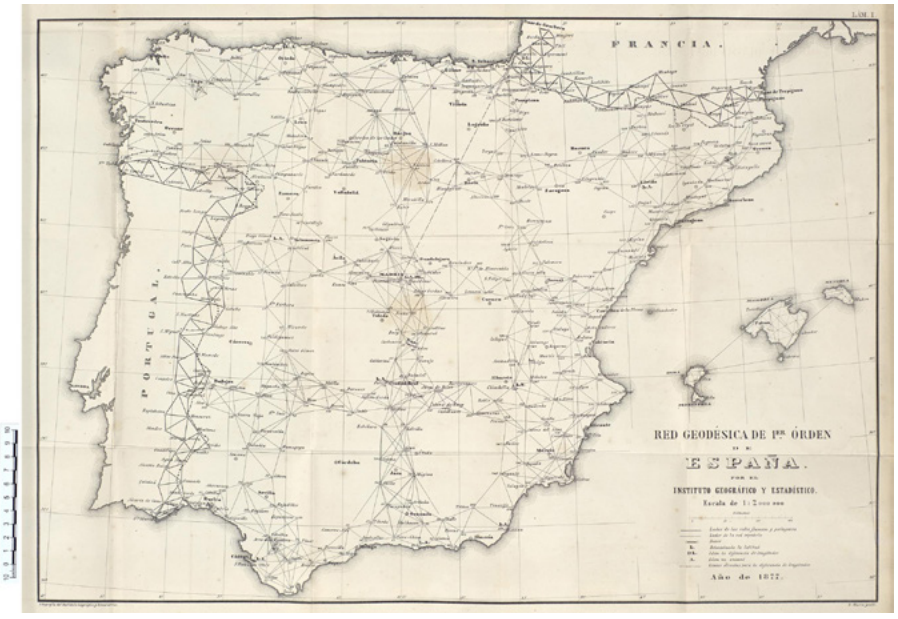
$$\frac{\text{valor 1 división del limbo}}{\text{nº divisiones del nonius}} = \frac{20'}{20} = 1'$$

La red geodésica

A continuación, vamos a describir cómo se dispuso y midió la red de puntos de referencia que sería clave para poder hacer mapas de calidad. A mediados del siglo XIX, cuando se plantea la tarea de desarrollar el mapa topográfico nacional a escala 1:50.000, se decidió establecer una red geodésica de primer orden constituida por vértices geodésicos situados en zonas elevadas (para poder tener una buena visibilidad entre ellos) con separaciones de unos 30-40 km. Mediante teodolitos geodésicos, se determinaron los ángulos de los triángulos formados entre estos vértices de referencia. Los teodolitos son telescopios terrestres que pueden girar alrededor de dos ejes perpendiculares entre sí, uno en horizontal y otro vertical, donde se lleva a cabo la lectura de esos ángulos sobre sendos limbos graduados con un sistema vernier, lo que proporciona grandes precisiones. Una vez determinados los ángulos de todos los vértices que conforman nuestra malla de triángulos geodésicos, por trigonometría podemos deducir las distancias relativas entre esos vértices: los ángulos determinan la proporción entre las longitudes de los lados de los triángulos.

La red geodésica de primer orden estaba formada por 10 cadenas de triángulos cuyos lados tienen una longitud media de 40 km. Cuatro cadenas tienen orientación norte-sur, por los meridianos de Salamanca, Madrid, Pamplona y Lleida. Otras tres cadenas transversales por los paralelos de Palencia, Madrid y Badajoz, y otras tres situadas en varias zonas del litoral de la Península.

Los astrónomos del Observatorio colaboraron muy activamente en las observaciones astronómicas de las dos cadenas fundamentales: paralelo y meridiano de Madrid.



Mapa de la red geodésica de primer orden, con las cadenas de triángulos fundamentales.

Además de coordenadas de muchas capitales de provincia, se calcularon las de diferentes vértices para poder controlar la marcha de la compensación, orientación y, en definitiva, la bondad de la red.

Posteriormente, se fue densificando el número de puntos con coordenadas conocidas, con triángulos más pequeños dentro de los triángulos grandes, y que se apoyaban en las coordenadas de los vértices de primer orden.

Como se ha mencionado previamente, esta se clasificó en tres categorías, que dependían del tamaño de los triángulos, de la metodología a utilizar y de su instrumental asociado. Las categorías fueron el primer, segundo y tercer orden. Los teodolitos empleados para medir la red geodésica de primer orden, que correspondía a las distancias más grandes, eran los más precisos, pero también los que más pesaban y eran más incómodos de transportar. Para medir distancias más pequeñas entre puntos que queremos plasmar en nuestro mapa, estos triángulos principales se subdividían en otros más pequeños, que conformaban la red geodésica de segundo y tercer orden, cuyos ángulos se medían con teodolitos más pequeños y manejables.

La triangulación de segundo orden, realizada entre 1860 y 1927, estaba constituida por triángulos de entre 10 y 25 km de lado y la unidad para observación y cálculo era la provincia. La de tercer orden, con lados de 5 a 10 km, se realizó de 1865 a 1930 y se calcularon por zonas correspondientes a cada una de las hojas del mapa topográfico nacional.

De este modo, ya disponíamos de la densidad necesaria de puntos con coordenadas planimétricas conocidas para los posteriores trabajos de levantamiento topográfico, como luego veremos.

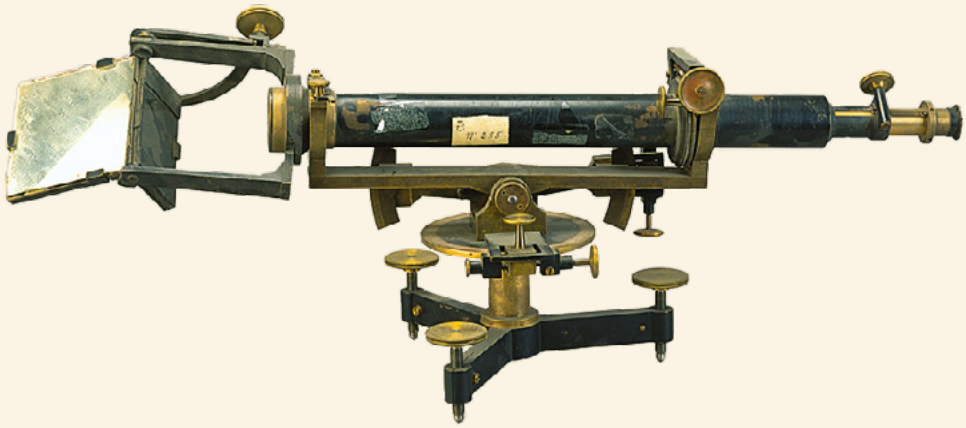
Teodolito geodésico de primer orden (Gustav Hiede, 1920). Por su época de fabricación se deduce que fue adquirido para comprobaciones de la red geodésica de primer orden, ya establecida para esa fecha.

Teodolito excéntrico de segundo orden (Kern & C.° Aarau-Schweiz. Suiza. Hacia 1870. Los teodolitos excéntricos tenían la ventaja de poder dar la vuelta de campana sin tropezar con el soporte del instrumento.

Un heliotropo para medir ángulos a grandes distancias

La triangulación geodésica de primer orden se basaba en vértices que estaban separados por varias decenas de kilómetros (en ocasiones hasta 100 km). Por lo tanto, en algunos casos, era imposible visualizar mediante el anteojo el punto de referencia de otro vértice, por estar excesivamente lejos. Para permitir medir referencias visuales muy distantes, se desarrollaron aparatos muy ingeniosos, como este heliotropo.

Los heliotropos son anteojos carentes de cualquier tipo de limbo, que delante de su objetivo disponían de un espejo que contaba con una montura altacimutal. Esto permitía capturar y enviar los rayos solares en una dirección horizontal y transmitir señales luminosas a varios centenares de kilómetros. Así, estas eran visibles desde el otro vértice en el que estaba situado el teodolito. También se desarrollaron linternas geodésicas para cumplir esta función y poder llevar a cabo medidas nocturnas.



Heliotropo (Brünner, París, hacia 1860). Posiblemente fue utilizado para la triangulación de la red geodésica de primer orden.

Linterna geodésica (Berdala, España, hacia 1880). El aparato dispone de un generador de acetileno obtenido mediante la reacción del carburo cálcico con el agua. El gas pasa a un quemador situado en el foco de un espejo cóncavo. La luz es enviada en la dirección del eje óptico del aparato a través de una lente convergente.

Ibáñez de Ibero y la base fundamental de Madridejos

Para poder asignar una escala absoluta de distancias a los triángulos de la red geodésica, cuyos ángulos se habían medido con precisión, era necesario medir un lado de un primer triángulo geodésico, que serviría así como «base» fundamental. Conocidos los ángulos de un triángulo y uno de sus lados, queda resuelto trigonométricamente el triángulo. Por propagación de distancias a los triángulos adyacentes, en los que ya se parte de un lado deducido, se podía así caracterizar las distancias entre todos y cada uno de los vértices geodésicos, por geometría simple.

En la primavera de 1854 se iniciaron los estudios para la selección de un terreno adecuado para emplazar la base fundamental de la triangulación, que se decidió ubicar en una llanura bien plana en el término de Madridejos, en la provincia de Toledo. Se trataba de medir la separación entre dos vértices geodésicos que, se concluyó, distaban 14.662,8964 m, una vez reducido al nivel medio del mar. La misión para medir esta base fundamental la dirigió en 1858 el general Ibáñez de Ibero, quien había supervisado el diseño y fabricación en París de la regla que se utilizó para esa tarea. Se trataba de una regla de platino e iridio de cuatro metros de longitud que se encuentra situada sobre una segunda regla de latón. Como ambos metales tienen coeficientes de dilatación diferentes, el alargamiento de una regla respecto a la otra, determinado mediante dos microscopios, permitía deducir la longitud real en cada caso, corrigiendo los efectos de dilatación con la temperatura, por pequeños que fueran.

Para efectuar una medida correcta, era fundamental que la regla se desplazase siguiendo una línea recta perfecta. Para ello, la regla se montaba sobre dos trípodes y se nivelaba perfectamente con ayuda de dos niveles tóricos acoplados, que aseguraban así el alineamiento horizontal. También se contaba con un anteojo colimador, con el

Regla de Ibáñez de Ibero, utilizada para medir la base fundamental de la cartografía española en 1858. Regla, trípodes y cobertizos se desplazaron 3.665 veces para cubrir la longitud total de la medición.

que se visualizaba una pequeña mira, que verificaba la perfecta alineación con la base que se pretendía medir. Además, la regla se protegía de la radiación solar directa mediante una serie de casetas móviles que se iban desplazando solidariamente al efectuar la medida, con el fin de evitar cambios bruscos de temperatura.

En cada extremo de la regla se instalaba un micrómetro-colimador perfectamente ajustado y se realizaban las medidas del inicio y final del tramo. Después, sin mover el micrómetro posterior, se ponía la regla a continuación, se alineaba adecuadamente con el anteojo, se nivelaba de nuevo y se hacía la medida de otro tramo. Y así hasta completar la distancia total de más de 14 kilómetros y medio.

La base patrón de Madridejos se midió en el año 1858. En esta misión importantísima para la geodesia española participaron cuatro científicos militares, cuatro auxiliares y cincuenta soldados de servicio. Hubo que desplazar la regla, las casetas y todos los instrumentos auxiliares más de 3600 veces, en cada ocasión con un cuidado exquisito. El resultado de esta hazaña fue una medida de extrema precisión para la época, con un error de tan solo dos milímetros y medio sobre esa distancia de más de 14 kilómetros. Cuando se crea el IGN en 1870, Ibáñez de Ibero pasó a ser su primer director, y aún hoy en día, la sede central del IGN y CNIG está situada en la calle Ibáñez de Ibero, en homenaje a esta figura clave en la historia de la geodesia de nuestro país. Gracias a esta medida tan precisa, la red geodésica sobre la que se basó la cartografía española sería de una gran fiabilidad en su escala de distancias. Aquí es relevante recalcar que, al abarcar la geodesia grandes superficies, en todos estos cálculos era necesario considerar la curvatura de la Tierra.

Anteojo colimador utilizado para la alineación de la regla.

Hasta 1875 la red peninsular contaba con una única base, por lo que era necesario proyectar y medir un sistema de bases secundarias, en zonas periféricas de la Península, que aseguraran la coherencia de la escala de toda la red geodésica. Entre 1875 y 1879 Ibáñez de Ibero procedió a la medición de cinco bases secundarias en Lugo, Arcos de la Frontera, Vic, Cartagena y Olite. Se trata de bases cortas, cuya longitud varía entre los 2 y 3 km, y que se unieron a la triangulación mediante redes auxiliares de ampliación y enlace. Estas bases se midieron con una regla geodésica similar a la ya descrita pero en la que la regla de platino fue sustituida por otra de hierro en forma de «T» invertida. La regla de platino no se quiso exponer a los avatares de la medición de otras bases y quedó custodiada como patrón fundamental de longitud.

En 1870 el gobierno suizo solicitó que Ibáñez de Ibero midiera con esta regla la base de Aarberg. En 1881 fue solicitado de nuevo para la medida de las bases de Bellizonde y Weeinfelden, también en Suiza. En definitiva, el esmero con el que Ibáñez de Ibero llevó a cabo las medidas geodésicas en la Península adquirió un gran reconocimiento a escala internacional.

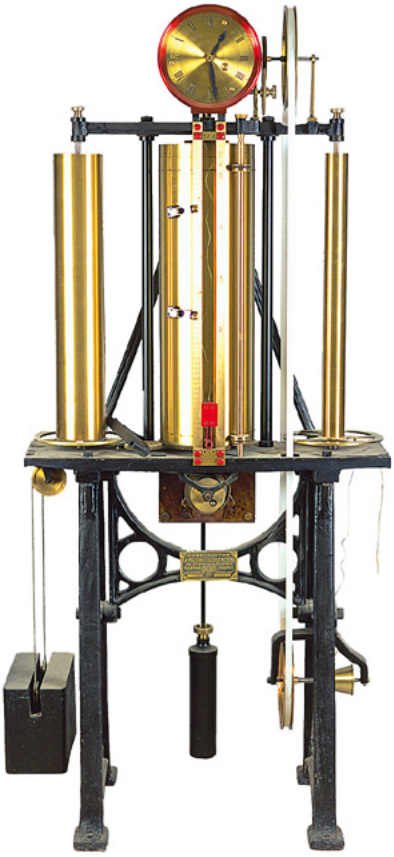
El mareógrafo de Alicante y la primera línea de nivelación

Hasta ahora nos hemos centrado en coordenadas planimétricas (latitud y longitud). Sin embargo, para construir un mapa topográfico completo, debemos también reflejar una tercera coordenada: la altitud en cada punto. Para medir coordenadas altimétricas es necesario definir un origen, y en el caso de España el origen de altitudes de la Península se determinó como el nivel medio del mar en Alicante.

Se eligió Alicante por varias razones: clima estable, cambios menos bruscos en el nivel del mar Mediterráneo que en el Cantábrico (la diferencia entre mareas en Alicante apenas llega a los 20 centímetros y en San Sebastián puede superar los 4 metros). Además la línea de ferrocarril Madrid-Alicante, inaugurada en 1858, permitiría crear una línea de nivelación hasta Madrid por el ferrocarril, utilizado habitualmente para estos fines por su baja pendiente y trazado regular.

En 1870 se instaló en el muelle de Levante del puerto de Alicante una regla de mareas, en la que desde julio de 1870 a febrero de 1874 un funcionario realizaba observaciones cuatro veces al día. El promedio de dichas observaciones estableció en nivel medio del mar respecto al cero del puerto.

La regla de mareas fue sustituida en 1874 por el primer mareógrafo, para determinar el nivel medio del mar que sirviera como referencia al sistema de altitudes. El mareógrafo está constituido por una boya que flota en el mar dentro de un edificio, similar a un tubo, y que está acoplada a un contrapeso, de forma que pueda registrarse la altura del mar en cada momento. El agua entraba a esta construcción cilíndrica por la parte inferior, manteniendo el agua en calma y evitando la influencia del paso de los barcos y el oleaje.



Mareógrafo (La Maquinista Valenciana, hacia 1874). Con este instrumento se determinó el nivel medio del Mediterráneo en Alicante.

En el rollo de papel se va registrando constantemente el nivel del agua que proporciona la boya y, tras descontar el efecto de las mareas y realizar la media de ese nivel, se establece el nivel medio del mar en Alicante como origen de altitudes.

Por las medidas efectuadas con el mareógrafo durante un largo período de años se llegó a la conclusión de que el nuevo nivel

cero difiere en apenas 5 centímetros del determinado con la regla de mareas.

La primera línea de nivelación que se observó fue Alicante-Madrid. La señal inicial (NP1) se encuentra en el primer peldaño de la escalera principal del Ayuntamiento de Alicante, cuya altitud es de 3,409 m y la última (NP26) en el centro de la rotonda del Edificio Villanueva del Real Observatorio de Madrid, con una altitud de 655,361 m.

Desde 1871 a 1922 se extienden los trabajos de nivelación geométrica por toda la península (Red de Nivelación de Precisión), estableciendo diferencias de altitud por medio de niveles de precisión y con ayuda de miras o estadías. Generalmente discurrían por carreteras y ferrocarriles.

Dicha red enlaza las costas del litoral peninsular, lo que permite estudiar las diferencias en el nivel del mar entre las diferentes costas, y se inicia la instalación de mareógrafos en varias ciudades: Santander, Cádiz, Santa Cruz de Tenerife (para establecer en origen de altitudes de las Islas Canarias), A Coruña, etc. Se deduce de estas mediciones que, por ejemplo, el nivel medio de Santander y Cádiz están 0,6742 m y 0,4148 m respectivamente por encima del nivel de Alicante.

Clavos correspondientes al inicio (NP1) y final (NP26) de la primera línea de nivelación Alicante-Madrid, situados en el Ayuntamiento de Alicante y en el Real Observatorio de Madrid, respectivamente.

Nivel de precisión (Kern, Aarau, Suiza, hacia 1870). Este instrumento fue utilizado a partir de 1871 para el establecimiento de la primitiva Red Española de Nivelación de Alta Precisión (N.A.P.)

En el mapa topográfico, estas coordenadas altimétricas se representan mediante curvas de nivel, que indican una misma elevación sobre el nivel del mar.

Todos los niveles disponían de un nivel de burbuja, que no es más que un tubo de vidrio de forma tórica y muy escasa curvatura, casi lleno de un líquido (alcohol o éter), dejando una burbuja que ocupa la parte más alta del tubo. Se situaba en la plataforma del instrumento o en el propio anteojo paralelo a su eje de colimación, lo que permitía, una vez «calado» situar perfectamente horizontal el anteojo y, por tanto, las visuales que por él se realizaban. La nivelación geométrica entre dos puntos cuyo desnivel se quería hallar se realizaba estacionando el instrumento en el punto medio y se hacía lectura sobre una regla vertical (mira altimétrica) situada en dichos puntos. La diferencia de las respectivas lecturas determinaban el desnivel. Las miras altimétricas solían ser de una sola pieza, construidas de un material que no se altere con los cambios de temperatura y disponían de un apoyo especial para garantizar la verticalidad.

Levantamientos topográficos

Para los levantamientos topográficos se densificaba la red geodésica hasta llegar a la topográfica, cuyos triángulos podían considerarse planos, facilitando considerablemente los cálculos. El fin de estos levantamientos era la captación de todos aquellos fenómenos geográficos y humanos que el topógrafo quería representar en el mapa.

Los trabajos topográficos constaban de dos fases: una planimétrica, o proyección horizontal del terreno, y otra altimétrica, con la determinación de altitudes de los diferentes puntos para el dibujo de las curvas de nivel.

Los teodolitos topográficos utilizados en las triangulaciones topográficas son similares a los geodésicos, miden ángulos horizontales y verticales, pero tienen menor tamaño y menor apreciación en la medida de los ángulos. Para los levantamientos se hacía uso del taquímetro que, además de medir ángulos horizontales y verticales, podía medir distancias con ayuda de una mira estadimétrica al disponer de una cruz filar con tres hilos horizontales y uno vertical, de modo que la diferencia de lectura en la mira graduada de los hilos extremos de la cruz permitía calcular la distancia. Solían tener un aumento mayor que los teodolitos y usualmente contaban con una aguja magnética (declinatoria) que permitía orientarlos con respecto a la meridiana magnética.

Las brújulas fueron otro aparato topográfico muy utilizado en los trabajos de relleno. Con estos instrumentos, los ángulos azimutales se medían respecto a la meridiana magnética (rumbo). La brújula señala la dirección de los polos magnéticos, no los geográficos, formando un ángulo entre ellos denominado declinación magnética, que está sujeta a multitud de variaciones.

Taquímetro. La Filotecnica Ing. A. Salmoiraghi & C, Milan; Recarte Hijo, Madrid, hacia 1900. En este aparato el anteojo puede dar la vuelta de campana y además es fácilmente reversible sobre las muñoneras.

Brújula taquimétrica. Breithaupt & Söhn, Hesse-Cassel; Recarte Hijo, Madrid, hacia 1890. El limbo cenital dispone de un vernier que permite apreciar 1'.

Tras el proceso de campo del levantamiento topográfico, el topógrafo vuelve al gabinete y calcula las coordenadas de los puntos observados realizando un dibujo geométricamente correcto conocido como minuta, que se pasa al delineante para su edición definitiva y la posterior constitución de las piedras litográficas.

Al avanzar el siglo XX, ese trabajo de campo se fue sustituyendo por fotogrametría, que consiste en obtener levantamientos planimétricos y altimétricos a partir de fotografías del terreno, eliminando o reduciendo los laboriosos trabajos topográficos de campo. Se basa en el principio de la fusión binocular, es decir, la visión estereoscópica, que permite efectuar medidas en las fotografías mediante estereocomparadores y posteriormente estereoautógrafos que facilita la restitución automática. Nuestro museo cuenta con algunas cámaras fotogramétricas históricas, tanto terrestres como aéreas, construidas hacia 1930.

En 1902, el Instituto Geográfico realizó los primeros ensayos de levantamientos fotogramétricos terrestres en Otero de Herreros (Segovia). Las conclusiones de este ensayo indicaban que la precisión alcanzada por este método igualaba a la de cualquier otro sistema, siempre que el terreno lo permitiese, considerándolo de gran ayuda en zonas de relieve accidentado. En 1914 se adoptó el método estéreo-fotogramétrico para los trabajos en zonas montañosas, aunque exigía trabajos complementarios de topografía clásica como la obtención de planos de población y la determinación de los perímetros de los municipios.

A partir de 1934 se empezó a aplicar la fotogrametría aérea en la producción del Mapa Topográfico Nacional.

Cámara fotogramétrica (Carl Zeiss Aerotopograph, ca. 1930). Este aparato combina una cámara fotográfica y un teodolito. Fue utilizado en fotogrametría terrestre para la obtención de planos a partir de tomas fotográficas del terreno.

Cámara fotogramétrica aérea (Carl Zeiss Aerotopograph, ca. 1930). Aunque permite realizar fotografías aisladas, lo habitual era realizar disparos seriados de modo que en cada fotograma se recogía parte del terreno común con la fotografía anterior y posterior, para permitir una visión estereoscópica entre dos fotogramas consecutivos.

El Mapa Topográfico a escala 1:50.000

La carta topográfica española nació como un proyecto de cartografía civil concebido inicialmente para uso general de la Administración, no solo para uso militar, como era habitual en la época. La principal fuente de ingresos de la Hacienda española era la Contribución territorial, por lo que el Catastro parcelario sería el instrumento para conseguir una política fiscal más justa y eficiente.

Tras varios vaivenes organizativos, por Decreto de 12 de septiembre de 1870 se creó, en el Ministerio de Fomento, el Instituto Geográfico, que dedicó la mayor parte de su actividad a la formación del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000.

Ibáñez de Ibero, primer director del Instituto Geográfico, tuvo que planificar un levantamiento topográfico que incluyera el deslinde de los términos municipales, la determinación de las masas de cultivo con extensión superior a 10 hectáreas, poblaciones, hidrografía, vías de comunicación, relieve, etc.

Los trabajos de campo fueron largos y arduos, lo que unido al cuello de botella que suponía la impresión de mapas por litografía, hizo que la primera serie completa del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000 se tardara en completar más de 90 años.

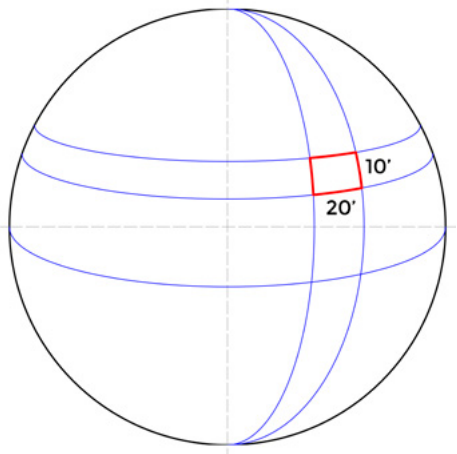
La primera hoja, correspondiente a Madrid, se publicó en 1875, mientras que la última hoja (San Nicolás de Tolentino, Gran Canaria) no salió a la luz hasta 1968. Durante este periodo de tiempo, hubo varias ediciones de las hojas más importantes, como la de Madrid, de la que se exponen en la sala varias ediciones.

Se utilizó como elipsoide de referencia el de Struve, con origen en el Real Observatorio de Madrid. La proyección elegida fue la poliédrica, sobre planos tangentes al mencionado elipsoide, con un formato de 10' de latitud por 20' de longitud.

El número final de hojas del Mapa Topográfico Nacional fue de 1106, de las cuales 1036 correspondían a la península, 26 a las islas Baleares, 42 a las islas Canarias, una a la isla de Alborán y una a las islas Columbretes.

En 1970 se modificó el sistema de referencia, sustituyendo el elipsoide de Struve por el de Hayford, adoptando Greenwich como origen de longitudes, Potsdam como datum y la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) en lugar de la poliédrica, para dar continuidad a la cartografía con su entorno europeo.

En 2007 se adopta el sistema ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989) como sistema de referencia geodésico oficial en España para la península ibérica y las islas Baleares. En el caso de las islas Canarias, se implanta el sistema REGCAN95. Ambos sistemas tienen asocia do el elipsoide GRS80.



Para confeccionar las hojas del mapa, se considera el territorio dividido por meridianos y paralelos separados 20' y 10' respectivamente.

La litografía

El sistema de reproducción elegido para imprimir los mapas fue la litografía, inventado por el alemán Alois Senefelder en 1796. Es un procedimiento de impresión para reproducir un dibujo o grabado realizado sobre la superficie de una piedra al estamparlo sobre una hoja de papel, basado en el principio de incompatibilidad natural entre sustancias grasas y acuosas.

Sobre una piedra caliza de alta porosidad, resistencia y absorbencia que presente una superficie regular y lisa, se dibuja el mapa con un lápiz graso; a continuación, se cubre la piedra con una capa de ácido nítrico y goma arábiga, que será rechazada por las partes dibujadas, por la incompatibilidad en la composición. A continuación, se entinta la piedra de forma que solo se impregnarán con la misma las partes dibujadas, por la adherencia entre sustancias grasas. La imagen entintada a presión se transpone a una hoja de papel utilizando la prensa.

Piedra litográfica expuesta en la sala, correspondiente al color negro de la hoja 947 (Jaén) del año 1907, del Mapa Topográfico a escala 1:50.000.

Para realizar litografía en color (cromolitografía), se debe ejecutar este proceso para cada color, con su correspondiente piedra litográfica. Para el Mapa Topográfico, se utilizaron cinco colores: azul para la hidrografía y franja marítima, verde para la vegetación y cultivos, siena para las curvas de nivel, rojo para las construcciones y red de carreteras y negro para los límites administrativos, vértices geodésicos, ferrocarriles, resto de red viaria y toponimia.

Desde 1875 hasta 1910 la reproducción de los trabajos cartográficos del Instituto Geográfico se realizaron por este lento y costoso procedimiento. Los talleres de grabado disponían de 5 prensas conocidas como de aspa o de Brisset (una para cada color). Cada hoja requería de seis meses de trabajo para su grabado a mano y otros cinco meses para su estampación.

La elección de la litografía, que permitía una gran calidad de reproducción, planteaba también una serie de inconvenientes: la piedra debía tener un grosor de 5 a 10 cm, lo que la convertía en un soporte muy pesado y de difícil transporte y almacenamiento, la estampación manual requería de prensas especiales y el trabajo de verdaderos especialistas.

Respetando la tradición del gremio de los grabadores, el Instituto Geográfico reconocía el talento de los litógrafos incluyendo su nombre en la hoja impresa. El principal grabador fue Pedro Peñas y Romero, autor de la tabla de signos convencionales y grabador de las primeras hojas del Mapa Topográfico.

Hacia 1912 el Instituto Geográfico sustituyó este método de impresión por el heliograbado en cobre.

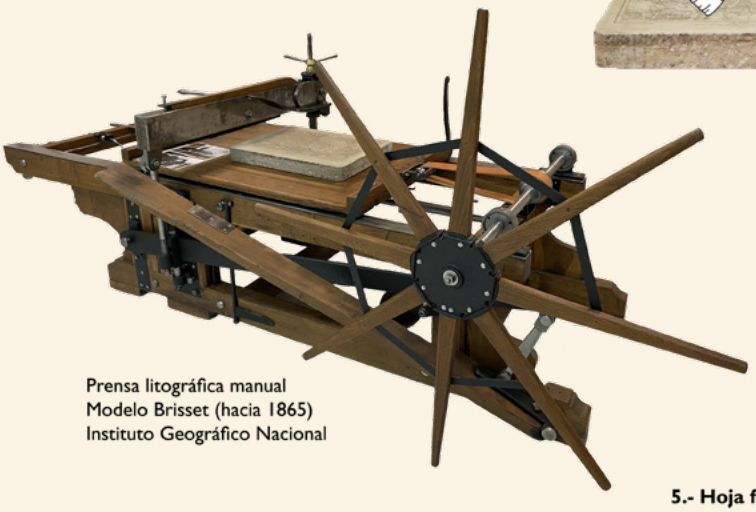
Proceso de la litografía

1.- Dibujo

Sobre la piedra caliza se dibuja el mapa con un lápiz graso. La imagen debe ser especular.

2.- Estampación

Se cubre la piedra con una fina capa de una solución de ácido nítrico y goma arábiga, que es rechazada por las partes dibujadas.



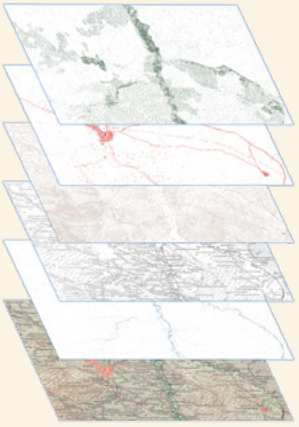
Prensa litográfica manual
Modelo Brisset (hacia 1865)
Instituto Geográfico Nacional

3.- Entintado

Se entinta la piedra. Solo se impregnarán de tinta las partes dibujadas por la adherencia entre sustancias grasas.

4.- Prensado

Con la prensa litográfica se presiona una hoja de papel contra la piedra litográfica y se obtiene la impresión de la imagen. Este proceso se repite para cada color, lo que requiere una piedra para cada uno de ellos.



5.- Hoja final

Para el Mapa Topográfico se utilizaron 5 colores: azul, verde, siena, rojo y negro. La calidad de la hoja dependerá del sistema de registro que se utiliza para ajustar las distintas piedras de cada color para su perfecta superposición.

Detalle de una de las escaleras de caracol del edificio Villanueva.

GEOFÍSICA Y METEOROLOGÍA

Tras examinar la superficie terrestre mediante la geodesia y plasmar sus accidentes geográficos gracias a la cartografía, ahora vamos a adentrarnos en los procesos físicos que emergen del interior de nuestro planeta. El movimiento y la sacudida de las placas tectónicas provoca, entre sus consecuencias más espectaculares, terremotos, también llamados sismos o temblores, que pueden tener efectos devastadores. De la misma forma, los procesos físicos que ocurren en el interior de la Tierra provocan que su estructura interna se pliegue sobre sí misma y se eleve a la superficie formando volcanes que, de forma periódica, pueden dar lugar a erupciones como la que vivió la isla de La Palma en 2021. La geofísica estudia todos estos procesos físicos terrestres, considerando a la Tierra como un sistema activo.

El estudio de la geofísica en el IGN tiene su origen y necesidad en la propia creación de la cartografía y de la primera red geodésica, de la mano de los ingenieros militares encabezados por el General Ibáñez de Ibero. La geofísica oficial comienza con la creación del Servicio Mareográfico y los primeros estudios gravimétricos como origen de la Red de Nivelación, para continuar con el Servicio Sismológico y los estudios de campo magnético. A diferencia de otros países europeos, la geofísica oficial en España nace en el IGN con un carácter principalmente instrumental y observacional, pero alejada de la faceta científica que caracterizaba a otras instituciones europeas. Hasta el año 1932 no se crea ninguna cátedra de geofísica en la universidad española.

Sismología

La sismología es la ciencia que estudia los terremotos, su origen y las causas que los producen. Para ello se usan los sismógrafos, instrumentos que registran la dirección y amplitud de las oscilaciones del suelo que provocan los terremotos, pudiéndose calcular su localización y magnitud a partir de sus registros. En el museo del Observatorio se exhiben varios sismógrafos de gran interés histórico, tanto de registro vertical como horizontal, así como de corto y largo periodo. También contamos con una balanza sismológica fabricada en 1886, en los orígenes de la sismología instrumental. Estos instrumentos históricos se contraponen a un sismógrafo digital moderno instalado también en la sala, que permite visualizar en tiempo real sobre una pantalla el movimiento del suelo.

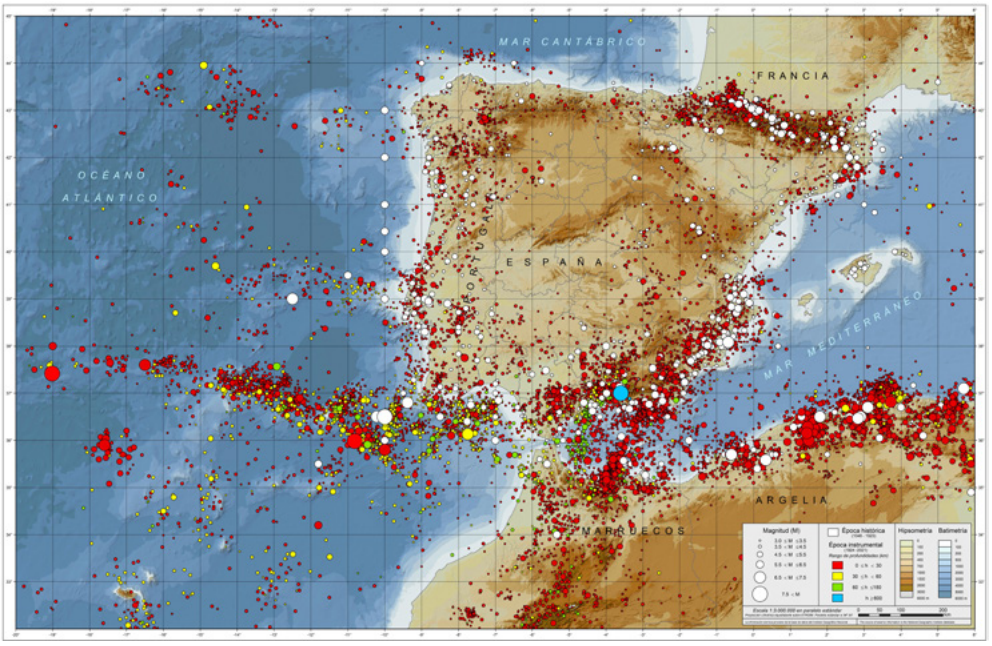
Los sismógrafos son instrumentos de detección de movimientos débiles del suelo, basados principalmente en sistemas pendulares. Para ello, tradicionalmente contaban con grandes masas, lo que proporcionaba al sistema una gran inercia. De esta forma, la masa del sismógrafo tiende a permanecer quieta respecto al suelo, lo que permite registrar su movimiento, ya sea horizontal o vertical. El tamaño de la masa hace variar el periodo propio, siendo los que tienen una mayor masa, aparatos de largo periodo, los que mejor responden a las señales de baja frecuencia procedentes de terremotos lejanos y los que disponen de una masa menor, los de corto periodo, son utilizados para el registro de sismos próximos que provocan movimientos de alta frecuencia.

El origen de la sismología instrumental en España está íntimamente relacionado con la ocurrencia del terremoto de Arenas del Rey (Granada) en diciembre de 1884, que ocasionó 800 víctimas e importantes daños. A raíz de este terremoto, comienza la instalación fundamentalmente de péndulos del tipo Rebeur-Paschwitz y balanzas que registrasen esos movimientos. El inicio de las actividades del IGN coincide en el tiempo con la instalación de los primeros sismógrafos en el mundo, y de esta forma, el ingeniero Eduardo Mier en 1906 diseñó la primera red sísmica nacional, con la creación del Servicio Sismológico Español y la construcción del Observatorio Geofísico de Toledo, dentro del IGN.

A comienzos del siglo XX, se extendió rápidamente el uso de los sismógrafos amortiguados, ya que permitía aumentar el periodo propio de los equipos para poder estudiar señales telesísmicas, mientras que los equipos que carecían de amortiguación solamente eran válidos para estudiar sismos más próximos.

De ese primer tipo de sismógrafos sin amortiguar, en la sala contamos con el sismógrafo Bosch-Omori. Se trata de un sismógrafo mecánico de péndulo horizontal sin amortiguamiento, con una masa de 25 kg, para el registro de las componentes

Sismógrafo horizontal Bosch-Omori (izquierda) que fue instalado en los observatorios de Toledo, Málaga, Almería y Alicante (1909-1925) y que, con una masa de 25 kg y sin amortiguamiento, fue la base de la primera red sísmica nacional. Los sismógrafos Wiechert horizontal (centro) y vertical (derecha), con masas de 1200 y 1000 kg, respectivamente, se instalaron en 1924 coincidiendo con la restructuración del Servicio Sismológico Español.



Sismicidad de la península ibérica y zonas próximas.

horizontales del movimiento del suelo, ideal para detectar sismos próximos. Este equipo fue instalado en los observatorios de reciente creación y estuvo en funcionamiento hasta el año 1925.

En el año 1920, se realiza la reorganización del Servicio Sismológico Español por los ingenieros Toradas e Inglada (este último es seguramente el sismólogo español de mayor prestigio internacional del siglo XX), instalándose en los observatorios modernos equipos del tipo Wiechert y Mainka. De este primer fabricante se muestran en la sala el sismógrafo de componente vertical Wiechert, instalado en el Observatorio Geofísico de Toledo en 1931, con una masa de 1200 kg sujeta por unos potentes muelles y un periodo propio de 5 segundos, y el equipo Wiechert horizontal, con una masa de 1000 kg por componente. Mediante dos bandas rotativas impulsadas por un sistema de relojería, podía registrarse el movimiento del suelo sobre bandas de papel ahumado.

Colapso de la bóveda central de la iglesia de Santiago Apóstol en Lorca, como consecuencia del terremoto del 11 de mayo de 2011, de magnitud 5,1.

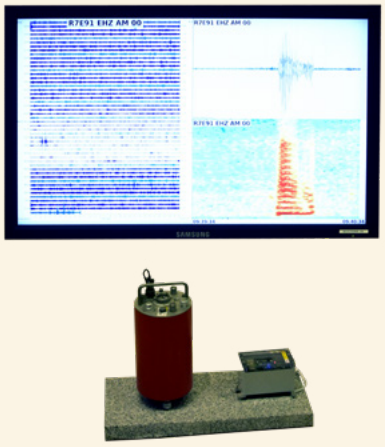
Un sismógrafo interactivo

Por contraposición a los sismógrafos antiguos, que tenían grandes masas y eran muy voluminosos, los sismógrafos modernos utilizan sensores y amplificadores para registrar señales en dimensiones mucho más reducidas. Estas señales digitalizadas nos permiten no solo estudiar el movimiento en función del tiempo, sino también la distribución de la energía en función de la frecuencia de la vibración.

En el museo contamos con un sismógrafo interactivo, que registra los pequeños movimientos de la estructura de la sala. Si los visitantes golpean el suelo, esto queda claramente registrado en tiempo real y puede verse en la pantalla. El panel superior derecho muestra un sismograma, es decir, cómo varía la velocidad del suelo en función del tiempo. El panel inferior derecho, por su parte, corresponde a un espectrograma, que indica cuánta energía ha liberado el seísmo en función de la frecuencia de vibración. Por último, el panel izquierdo muestra el sismograma acumulativo de las últimas horas, donde podemos apreciar si ha ocurrido algún pico de actividad sísmica.

Si el golpe se produce de una forma instantánea y no organizada, se transmite energía en forma de ondas de alta y baja frecuencia que se registran en todo el espectrograma. Si esta energía se transmite en forma de movimientos acompasados, la energía tiene un alto contenido en baja frecuencia y se registra con mayor amplitud en la parte baja del espectrograma. De esta forma, el público puede simular el registro en este sismógrafo interactivo de un sismo próximo, un sismo lejano e incluso el de un movimiento de tremor volcánico.

Combinando la información proporcionada por sismógrafos situados en distintos lugares de la geografía española, los expertos de la red sísmica nacional pueden alertar de la ocurrencia de un terremoto, incluso localizar la posición del epicentro y su profundidad. Esto nos ayuda a paliar, en la medida de lo posible, los efectos de los terremotos potencialmente destructivos.



Sismógrafo interactivo en tiempo real. Los saltos del público provocan movimientos en la estructura de la sala, lo mismo que lo haría el paso de las ondas de los terremotos próximos y lejanos.

Volcanología

La volcanología estudia los procesos volcánicos y su evolución. Desde 2004, el Instituto Geográfico Nacional es el responsable de la vigilancia y alerta volcánica en el territorio español. Dentro del proceso volcánico, uno de los principales precursores es la actividad sísmica asociada al movimiento del magma. Por eso, existe una estrecha relación entre la sismología y la actividad volcánica, ya que la acumulación de pequeños seísmos es uno de los principales precursores de la erupción de un volcán.

En el año 2011 tuvo lugar una erupción submarina frente a la isla de El Hierro. Por suerte, esta erupción no llegó a afectar directamente a la isla, y dio lugar a la formación de un nuevo volcán submarino conocido como Tagoro. En nuestro museo contamos con dos muestras de aquella erupción. La primera es un globo de lava que fue recogido desde un barco. Estos globos de lava, humeantes, eran los signos más evidentes de la erupción vista desde la superficie; típicamente flotaban durante algunos minutos, hasta que se enfriaban y se llenaban de agua, para volver a caer así al fondo del mar.

Muestras de la erupción submarina de El Hierro de 2011.

La segunda muestra de la erupción submarina de El Hierro es una restingolita. El término viene del municipio de La Restinga, en cuyas playas se encontró un gran número de estas rocas. Lo peculiar de las restingolitas es que, a pesar de ser negras por el exterior, su interior tiene un color blanquecino. Este material claro es vidrio volcánico rico en sílice, que podría tener su origen en una erupción mucho más antigua, que quedó rodeado por una capa basanítica durante la erupción de 2011 y salió a flote, gracias a su baja densidad.

Entre septiembre y diciembre de 2021, una fuerte erupción volcánica afectó al sur de la isla de La Palma. En el museo contamos con varias muestras de esta erupción traídas desde las inmediaciones del volcán por expertos del IGN que se encontraban en el terreno. El material piroclástico, expulsado por alguna de las bocas del volcán, se denomina ceniza volcánica cuando está formado por partículas de un tamaño inferior a 2 mm. Esta ceniza, que inicialmente queda en suspensión en el aire, va depositándose poco a poco en la superficie.

La muestra volcánica más espectacular que se muestra en la sala es probablemente una bomba volcánica de más de 20 kg. Se denomina bomba volcánica al material piroclástico con un tamaño superior a 6,4 centímetros que es expulsado por la boca del volcán a distancias de cientos de metros, incluso a unos pocos kilómetros, como si se tratara de un proyectil. También contamos con un fragmento de la colada de lava que fluía lentamente sobre la superficie del terreno hasta el mar. Por último, una roca con depósitos de azufre, de color amarillento, pone de manifiesto el proceso de sublimación, o paso de fase gaseosa a sólida, de los gases ricos en azufre eyectados por el volcán.

La erupción volcánica de La Palma de 2021

En septiembre de 2021, la isla de La Palma se convirtió en un foco de atención mediática internacional por una intensa erupción volcánica en el sur de la isla. La erupción comenzó el 19 de septiembre de 2021 en el parque natural Cumbre Vieja, donde el magma comenzó a emerger a la superficie a través de dos fisuras y ocho bocas. La erupción estuvo precedida por miles de pequeños terremotos que fueron detectados en el sur de la isla, de los cuales alrededor de 1400 pudieron ser localizados con precisión. Durante las siguientes semanas, las coladas de lava avanzaron lentamente por la superficie hasta alcanzar el mar, donde acabaron por formar varios deltas lávicos de nuevo terreno ganado al mar. La erupción finalizó el 13 de diciembre de 2021.

Se trata de la primera erupción en la isla de La Palma desde la erupción de Teneguía en 1971. Con 85 días de actividad, esta erupción es la más larga conocida en la isla, y la tercera más larga registrada en el archipiélago canario (tras Timanfaya en Lanzarote y Tagoro en El Hierro). La erupción obligó a desalojar a unos siete millares de personas y los daños materiales y sobre infraestructuras que provocó fueron muy cuantiosos.

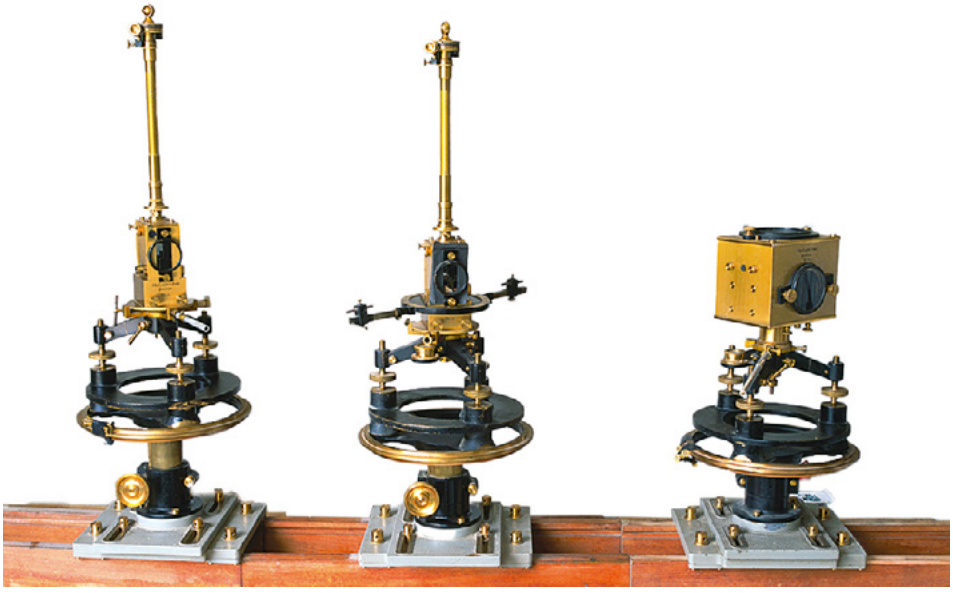
Erupción de 2021 en La Palma.

Geomagnetismo

El magnetismo terrestre es un fenómeno natural originado por el movimiento de metales fluidos en el núcleo externo terrestre. Debido a ello y a la rotación de la Tierra, esta se comporta como una dinamo gigante que produce un campo magnético alrededor de nuestro planeta. El campo magnético terrestre es el responsable de que las brújulas apunten aproximadamente hacia el norte, lo que durante muchos siglos ha sido una herramienta fundamental para la orientación de marinos y exploradores.

La intensidad del campo magnético de la Tierra es muy pequeña, pero suficiente para protegernos del viento solar que nos llega a diario. En el museo contamos con algunos de los instrumentos que se utilizaban para hacer trabajos de geomagnetismo.

Los variómetros registran variaciones muy pequeñas del campo magnético, pero lo hacen de forma relativa a una medida absoluta. Por su parte, un magnetómetro permite medir el valor absoluto del campo. Por ejemplo, el magnetómetro de Schmidt permite medir el valor absoluto de la componente horizontal del campo magnético y de la declinación (ángulo que forman las líneas de campo con la dirección norte-sur). Típicamente, en un observatorio geomagnético se realizaba una medida diaria del valor absoluto del campo con el magnetómetro y se registraban las variaciones de ese valor a lo largo del día para monitorizar de forma continua el campo magnético.



Equipo de variómetros geomagnéticos (Otto Toepter & Söhn, Postdam, hacia 1930). Este equipo, para la medida de las tres componentes (dos horizontales y una vertical), fue el primero que adquirió el Instituto Geográfico Nacional con destino en el Observatorio de Toledo, prestando servicio entre 1935 y 1980.

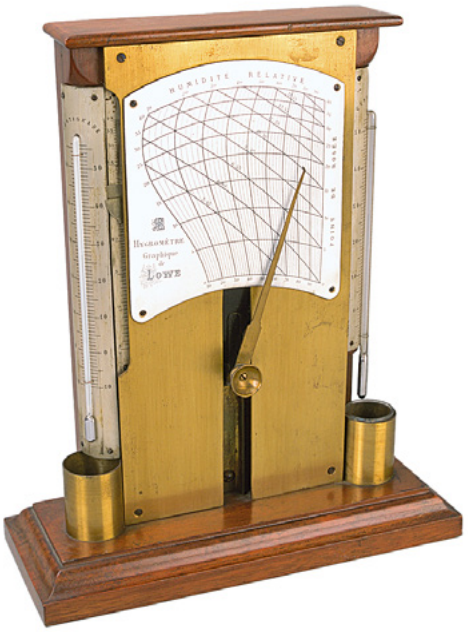
Magnetómetro de tipo Schmidt (Askania Werke A.G. Bambergwerk, Berlin-Friedelnau, comienzos del siglo XX). Utilizado para las medidas absolutas del geomagnetismo, consistía básicamente en un teodolito que permitía visualizar un punto de azimut conocido a 1 km y simultáneamente a un espejo solidario a un imán sobre una escala graduada.

Caja de oscilaciones (Berlin-Friedelnau). Consistía en un imán horizontal cuyo periodo de oscilación era calculado por un procedimiento de «vista y oído», observando 100 oscilaciones del imán y simultáneamente oyendo, y contando, el batir del escape de un cronómetro de medios segundos.

Meteorología

Desde la primera época del Observatorio, ya se hacían observaciones meteorológicas varias veces al día (presión, temperatura, estado de la atmósfera, velocidad del viento...). La misión principal era la de hacer predicciones y comunicarlas a los puertos y capitales de provincia. Podemos ver diversos instrumentos de medida tales como el hipsómetro y el barógrafo, que sirven para medir la presión atmosférica; varios anemómetros para medir el sentido y la velocidad del viento con su anemoscopio para el registro gráfico, así como termómetros y psicrómetros para la medida de la temperatura y de la humedad del aire.

Algunas de las medidas meteorológicas se hacían en el templete del edificio de Villanueva. En 1904 la meteorología se independiza del Observatorio y pasa a ser competencia del Instituto Central de Meteorología (creado anteriormente, pero que inicialmente tenía a su cargo solamente la predicción del tiempo y su difusión, y precursor de la actual AEMET).



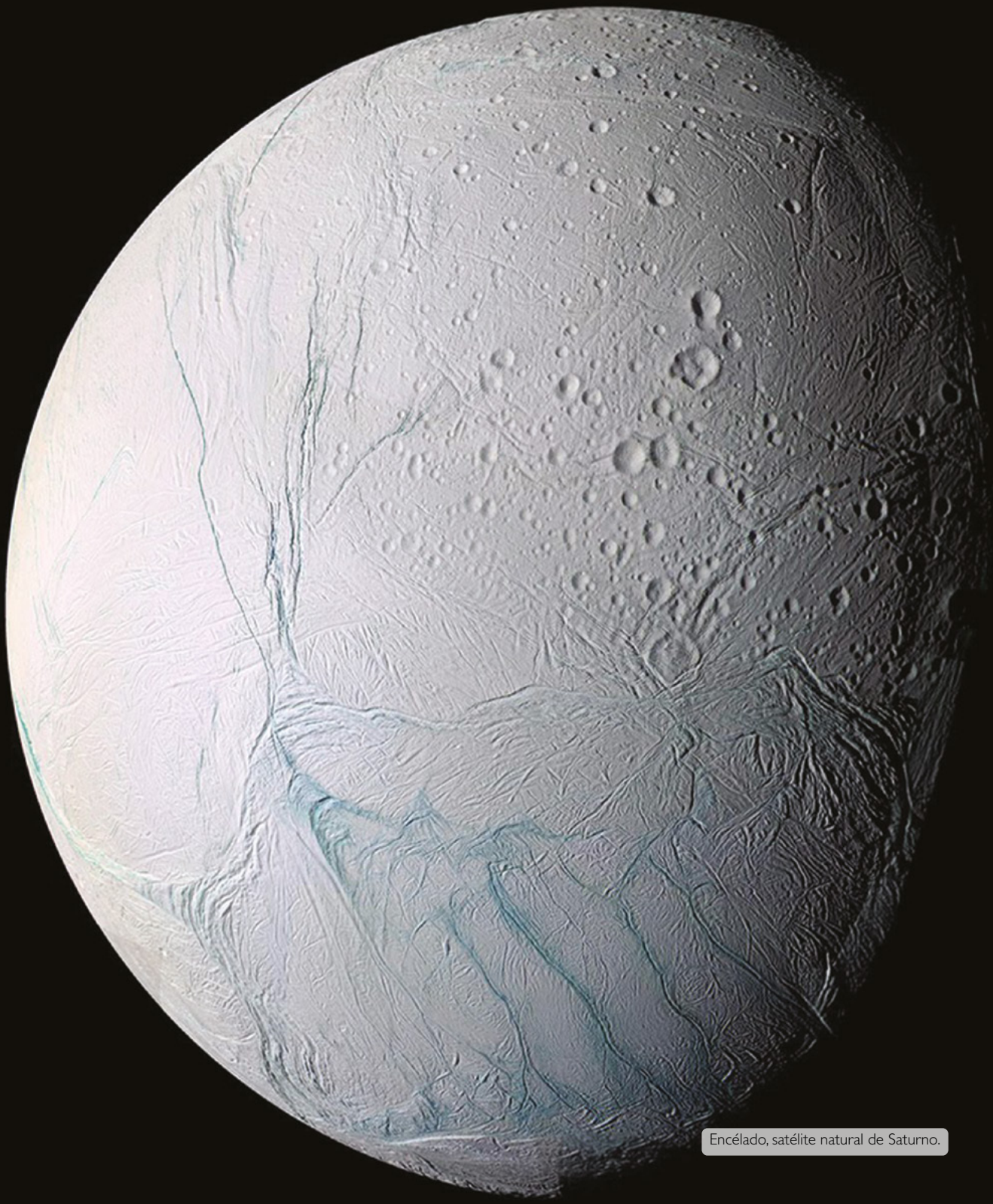
Psicrómetro. Hygromètre Graphique de Lowe, Francia, hacia 1880. Dispone de dos termómetros, húmedo y seco, y un ábaco gráfico para señalar la humedad relativa del aire en función de la diferencia de temperatura entre los termómetros.

Veleta anemómetro. Negretti y Zambra, Scientific Inst. Maker, Londres, hacia 1880. Solidario a la veleta tiene un tubo de vidrio en forma de "U" con uno de sus extremos encarando el sentido del viento. Lleno este tubo de agua, el desnivel en las dos ramas, medido sobre una escala, permitía conocer la velocidad del viento.

Hipsómetro. L. Casella Maker to the Admiralty, Londres, hacia 1880. Mide la presión atmosférica y permite determinar altitudes, por medio de la medida de la temperatura de ebullición del agua, ya que esta hierve cuando su presión de vapor iguala a la presión atmosférica. El elemento esencial en este instrumento es el termómetro de alta calidad con el que está dotado.

Termómetro de mínima. Negretti y Zambra, Londres, hacia 1890. En el líquido existente en el tubo termométrico se encuentra sumergido un pequeño dial de marfil. La contracción del líquido por descenso de la temperatura hace que el menisco de este arrastre a esta pieza de marfil hasta la temperatura mínima alcanzada; por el contrario, una dilatación no la mueve, pues el líquido pasa entre él y las paredes del tubo.

EL REAL OBSERVATORIO DE MADRID HOY



Encélado, satélite natural de Saturno.

UN OBSERVATORIO A LA VANGUARDIA DE LOS AVANCES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS

A lo largo de su dilatada historia, el Real Observatorio de Madrid ha sabido adaptarse a los nuevos tiempos y siempre ha procurado estar a la vanguardia de los avances tecnológicos. Como ejemplos de esta ambición podemos destacar el importante encargo realizado a finales del siglo XVIII a William Herschel, líder mundial en la construcción de telescopios, la adquisición de un círculo meridiano a mediados del siglo XIX con el fin de proporcionar la más precisa medida del tiempo y de la posición de las estrellas, o los telescopios adquiridos a comienzos del siglo XX para observar eclipses y desvelar la estructura del Sol, nuestra estrella más próxima.

Observatorio de Yebes, en Guadalajara (IGN).

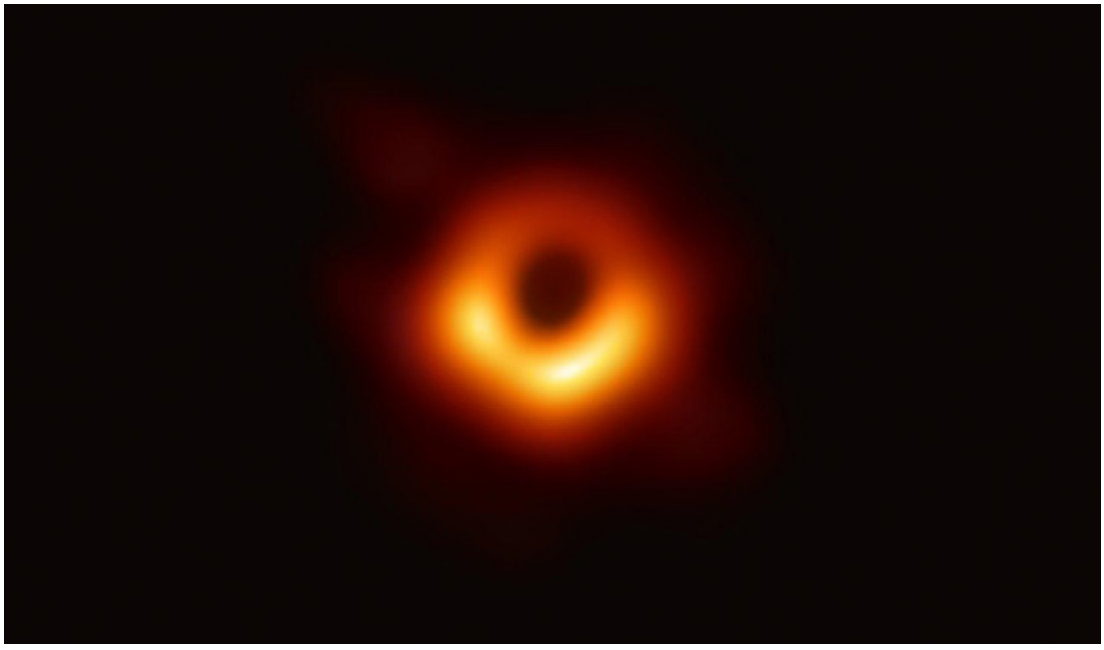
Hoy en día, la contaminación lumínica de la capital hace imposible llevar a cabo observaciones astronómicas profesionales desde el Observatorio, pero los astrónomos que trabajamos aquí tenemos acceso a algunos de los mejores telescopios del planeta. Hasta el siglo XX, casi todos los estudios astronómicos se centraban en el análisis de la luz que perciben nuestros ojos, la luz visible, con longitudes de onda de algunos cientos de nanómetros (ligeramente por debajo de una milésima de milímetro). El siglo XX ha visto la eclosión de la astronomía en otros rangos de longitud de onda con el lanzamiento de satélites espaciales capaces de detectar radiación infrarroja, ultravioleta o incluso rayos X. Además, hemos sido capaces de desarrollar la tecnología necesaria para captar y amplificar las tenues señales que nos llegan desde el espacio en ondas de radio, y que nos han permitido deducir la presencia de ingentes cantidades de materia oscura en el universo a partir del movimiento de la galaxias o confirmar la existencia de galaxias en su infancia poco después del Big Bang.

El Instituto Geográfico Nacional ha construido y opera un observatorio astronómico en Yebes, Guadalajara, donde se

sitúa un potente radiotelescopio de 40 metros de diámetro. Se trata de uno de los radiotelescopios más grandes de Europa, que ha contribuido a la identificación de una gran cantidad de moléculas nunca antes detectadas en el espacio. El telescopio de 40 metros puede además operar de manera simultánea y coordinada con otros radiotelescopios del planeta, en una técnica que conocemos como interferometría de muy larga línea de base (VLBI). Esta técnica permitió, por ejemplo, obtener la primera imagen del horizonte de sucesos de un agujero negro en 2019.

El desarrollo de la radioastronomía conlleva enormes retos tecnológicos. En este sentido, el personal técnico del Observatorio de Yebes (principalmente ingenieros de telecomunicaciones) desarrollan amplificadores criogénicos de bajo ruido que son un referente mundial en su campo. Son piezas fundamentales para la detección de las débiles señales cósmicas en el dominio de las ondas de radio. Conectados a una antena parabólica, y asistidos por otros dispositivos electrónicos, nos permiten, metafóricamente, escuchar la radio del cosmos, lo que nos informa sobre un sinfín de procesos fascinantes.

El Observatorio de Yebes no solo busca ampliar nuestro conocimiento del universo, sino también profundizar en la comprensión sobre la forma de nuestro propio planeta. De eso se encarga la geodesia, tal y como comentábamos a raíz de los instrumentos que se muestran en nuestro museo. Hoy en día, las técnicas de radioastronomía sirven de forma auxiliar a la geodesia, ya



Primera imagen del horizonte de sucesos de un agujero negro, en el corazón de la galaxia M87, publicada en abril de 2019 (colaboración EHT)

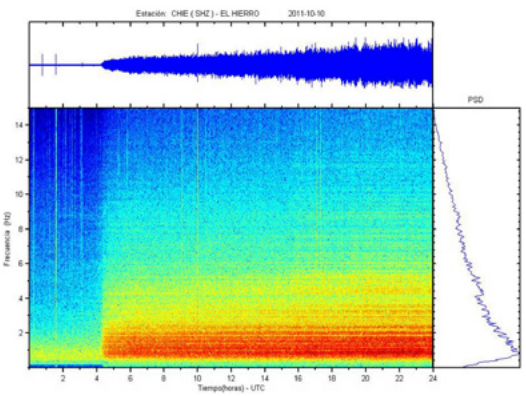
que la observación de objetos astronómicos brillantes y lejanos mediante distintos radiotelescopios del mundo hace posible deducir con gran precisión cuál es la forma de la Tierra, cuáles son sus parámetros de orientación o cómo se desplazan las placas tectónicas. Es la llamada geodesia espacial, algo que sin duda habría maravillado a pioneros como Eratóstenes o Ibáñez de Ibero, de los que hablábamos antes.

La cartografía también se ha beneficiado de los últimos avances tecnológicos. A lo largo del siglo XX, se fueron incorporando técnicas de fotogrametría, que agilizaron de forma notable el desarrollo de una cartografía precisa y detallada. Hoy en día, la ortofotografía es una pieza fundamental en la construcción de mapas de calidad. Además, las labores ortofotográficas se acompañan de la tecnología LiDAR, en la que se utiliza un sistema láser para obtener nubes de puntos del terreno con coordenadas tridimensionales. Así, y con la ayuda de sistemas de posicionamiento global (GNSS), el IGN produce mapas de gran detalle y precisión.

El IGN también tiene encomendada una labor fundamental de vigilancia sísmica y volcánica. Para ello, mediante la red sísmica nacional, se monitorizan de forma constante los terremotos que ocurren en nuestro territorio gracias a más de cien estaciones sísmicas, tanto fijas como móviles, así como una avanzada red de acelerógrafos. La detección de enjambres sísmicos es especialmente relevante en el caso de las islas Canarias, ya que pueden anticipar una erupción volcánica. El IGN cuenta con personal especializado en volcanología destinado en Canarias, que realiza un seguimiento pormenorizado de la actividad volcánica de las islas. En este sentido, sismología, geodesia, gravimetría y volcanología son disciplinas estrechamente relacionadas, de ahí la importancia de estudiarlas de forma interconectada tal y como hacemos desde el Observatorio.

Hoy en día, el Real Observatorio de Madrid es un centro puntero de investigación en el campo de la radioastronomía y también acoge un grupo de geofísica del IGN. Los investigadores del Observatorio estudian el nacimiento y las últimas fases en la vida de las estrellas, la química del medio interestelar o la estructura y evolución de las galaxias. Por su parte, los especialistas en geofísica llevan a cabo sofisticados estudios sobre volcanología, sismología y gravimetría.

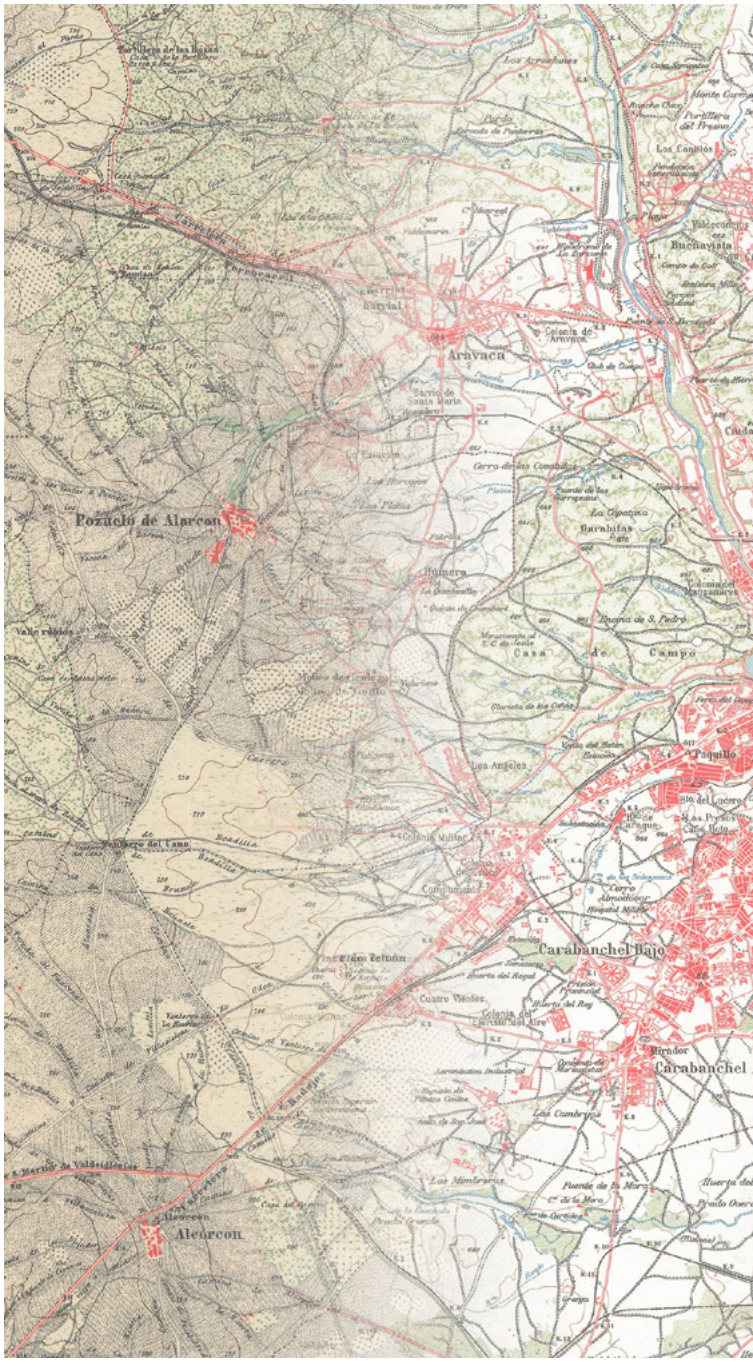
El Real Observatorio de Madrid tiene un fuerte compromiso con la divulgación. Cuenta con visitas guiadas para público general, grupos escolares y universitarios, acogiendo a miles de personas cada año. Desde el Observatorio, se atiende a medios de comunicación sobre temas astronómicos y geofísicos de actualidad. También se responden consultas para fines de lo



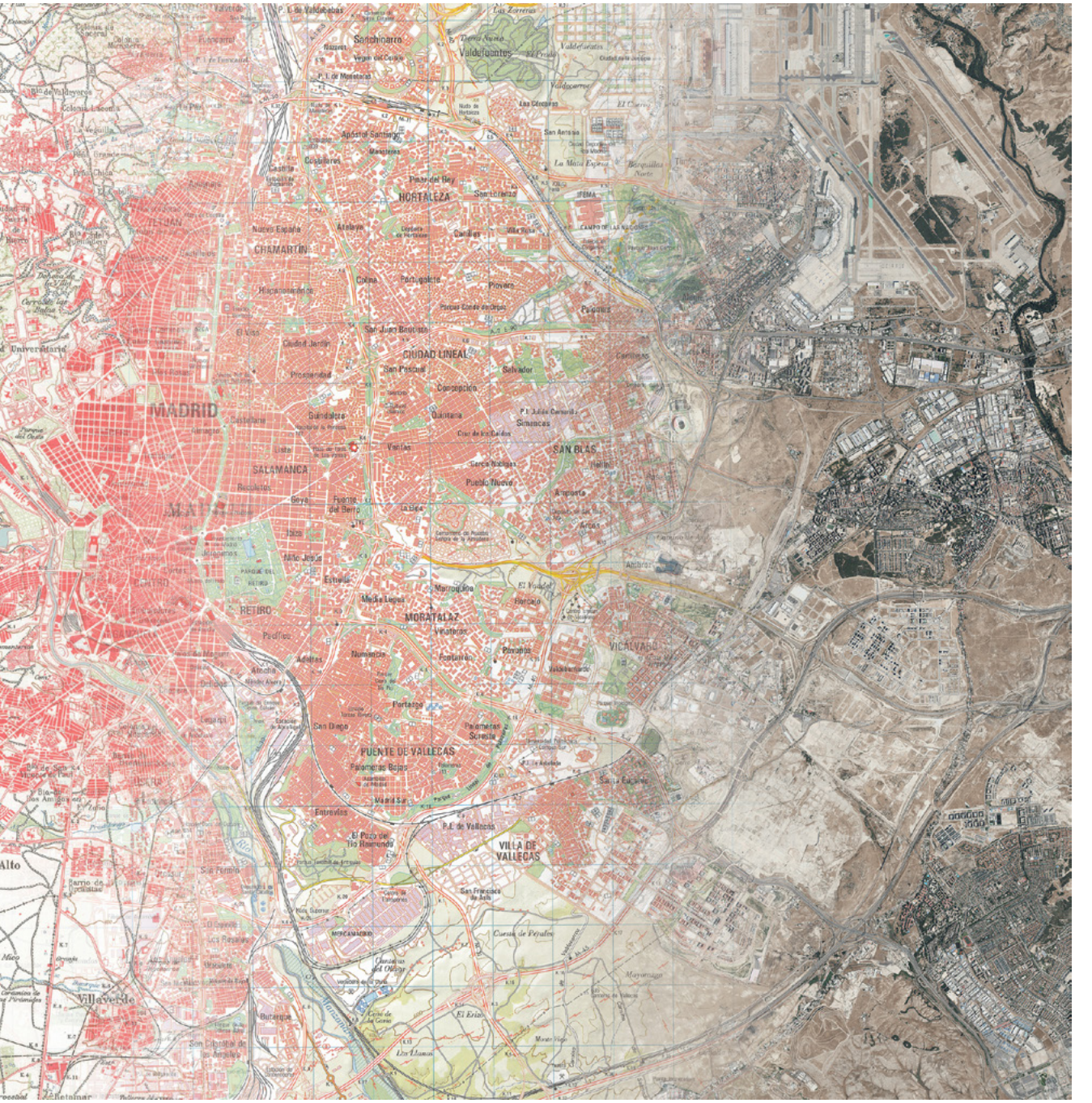
Forma de onda y espectrograma del registro sísmico del día en que empezó la erupción del volcán Tagoro en la isla de El Hierro (10 de octubre de 2011).

más diversos, proporcionando información de carácter oficial en temas astronómicos. Igualmente, llevamos a cabo actividades de divulgación mediante nuestra página web, redes sociales y en ciclos de actividades como la Semana de la Ciencia.

En definitiva, el Real Observatorio de Madrid es un lugar excepcional, cuya candente actividad científica se extiende desde el siglo XVIII hasta nuestros días. El enfoque de las investigaciones realizadas aquí a lo largo del tiempo ha ido íntimamente unido al desarrollo tecnológico, acompasado con los últimos avances técnicos e instrumentales. Al fundarse en 1790, el Observatorio se encontraba en un promontorio alejado del bullicio urbano, en los confines de la ciudad de Madrid y libre de contaminación lumínica. Hoy en día, a pesar de encontrarse en el corazón de la capital, el Observatorio sigue siendo un remanso de paz que sorprende a sus visitantes y donde se reciben y analizan datos de los telescopios más avanzados del planeta o se estudian terremotos y erupciones volcánicas. Seguramente, los primeros astrónomos de esta institución no podrían imaginar que en el siglo XXI íbamos a estudiar desde aquí objetos tan misteriosos y fascinantes como los agujeros negros, que escapan a nuestra intuición, y desarrollar radiotelescopios que nos permitirían fotografiarlos. Pero, sin duda, aquellos pioneros compartían con nosotros la pasión por la ciencia y la curiosidad por el universo que nos rodea.



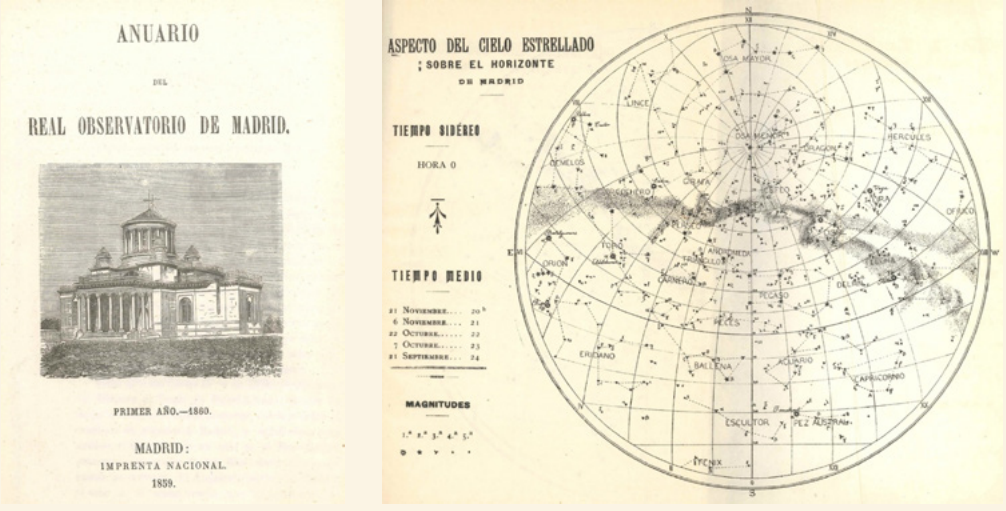
Evolución de la cartografía. Hoja 559 del MTN 1/50.000. De izquierda a derecha, transición entre las ediciones de cartografía de 1785, 1969, 2012 y ortofotografía de 2017.


HORTALEZA
CHAMARTÍN
CIUDAD LINEAL
MADRID
SALAMANCA
RETIRO
MORATALAZ
VICÁLVARO
SAN BLAS
PUENTE DE VALLECAS
VILLA DE VALLECAS
Villaverde

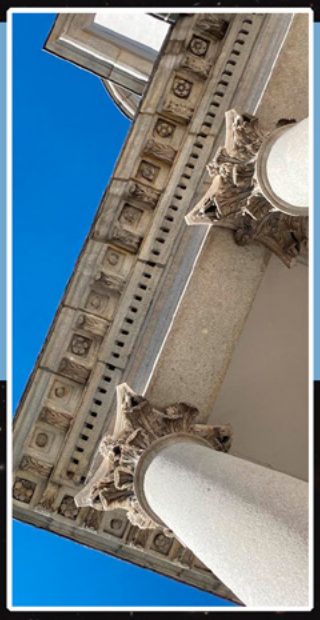
Un anuario astronómico con mucha historia

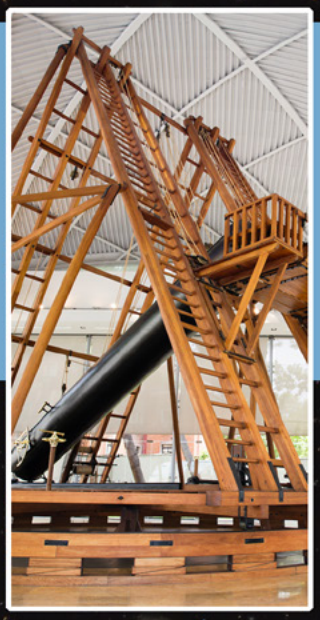
El Anuario del Real Observatorio Astronómico de Madrid fue uno de los frutos de la refundación del Observatorio en época de Isabel II y se viene publicando de forma casi ininterrumpida desde 1860 hasta nuestros días. Se impulsaba así una labor que ya llevaban a cabo en aquella época otras instituciones europeas, tomando como modelo el *Annuaire du Bureau des Longitudes* francés. Desde sus orígenes, el Anuario ha prestado una especial atención a los calendarios, efemérides solares y lunares, al igual que otros fenómenos celestes destacados. También se incorporaban tablas auxiliares para cálculos astronómicos (y, en el comienzo, datos meteorológicos). Además, desde sus inicios, el Anuario incluye varios artículos de divulgación sobre temas diversos que están destinados al gran público.

Desde la publicación del primer Anuario en 1860, solo dejó de publicarse de manera excepcional durante unos pocos años: en 1867, 1874, 1875 y desde 1881 hasta 1906. En gran medida, estas interrupciones se debieron a problemas económicos, aunque en la interrupción más prolongada (1881-1906) parece que había también dificultades asociadas a la gestión del Observatorio, que por aquella época dependía de la Universidad. Con la incorporación del Observatorio al Instituto Geográfico, en 1904, se vuelve a impulsar la creación del Anuario y, desde 1907, se ha publicado sin interrupciones. Todavía hoy, el Anuario sigue contribuyendo a los cometidos del Observatorio de difundir la información oficial en materia de astronomía y de intensificar la divulgación de esta ciencia.



Portada del primer Anuario (1860) y un ejemplo de mapa celeste.





Fundado en 1790, el Real Observatorio Astronómico de Madrid sorprende a sus visitantes con un espacio en el que conviven ciencia, historia y patrimonio. El edificio de Villanueva es uno de los máximos exponentes de arquitectura neoclásica en España y la reproducción del gran telescopio de William Herschel es única en el mundo. Un pequeño museo da cuenta de la dilatada historia de esta institución.