

MAPPING

VOL. 31 • Nº 207 • PRIMER SEMESTRE 2022 • ISSN: 1131-9100



CALIDAD FUNCIONAL:
un nuevo enfoque sobre la calidad de datos

Vigilancia y seguimiento de la erupción de Cumbre Vieja, La Palma (España)

Nuevo catálogo macrosísmico de terremotos perceptibles en Cuba 2017-2020

HISTORIA DE LA CARTOGRAFÍA

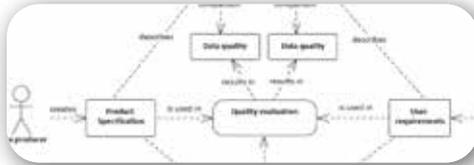
**Los terremotos y sus primeros estudios en el Instituto Geográfico:
observatorios,
mapa sismotecnológico y
catálogo sísmico**



MAPPING

VOL.31 N°207 PRIMER SEMESTRE 2022 ISSN 1131-9100

Sumario



Pág. 04

Calidad funcional: un nuevo enfoque sobre la calidad de datos. *Functional quality: a new approach to data quality*

Francisco Javier Ariza López, Juan Francisco Reinoso Gordo, José Luis García Balboa, Antonio Federico Rodríguez Pascual



Pág. 16

Vigilancia y seguimiento de la erupción en Cumbre Vieja, La Palma. *Eruption surveillance and monitoring at Cumbre Vieja, La Palma (Spain)*

Carmen López Moreno



Pág. 30

Nuevo catálogo macrosísmico de terremotos perceptibles en Cuba 2017 – 2020. *New macroseismic catalog of perceptible earthquakes in Cuba 2017 – 2020*

Antonio Salgado Castillo, Raúl Palau Clares



Pág. 42

Historia de la cartografía



El conocimiento de hoy es la base del mañana

MAPPING es una publicación técnico-científica con 31 años de historia que tiene como objetivo la difusión de las investigaciones, proyectos y trabajos que se realizan en el campo de la Geomática y las disciplinas con ella relacionadas (Información Geográfica, Cartografía, Geodesia, Teledetección, Fotogrametría, Topografía, Sistemas de Información Geográfica, Infraestructuras de Datos Espaciales, Catastro, Medio Ambiente, etc.) con especial atención a su aplicación en el ámbito de las Ciencias de la Tierra (Geofísica, Geología, Geomorfología, Geografía, Paleontología, Hidrología, etc.). Es una revista de periodicidad bimestral con revisión por pares doble ciego. MAPPING está dirigida a la comunidad científica, universitaria y empresarial interesada en la difusión, desarrollo y enseñanza de la Geomática, ciencias afines y sus aplicaciones en las más variadas áreas del conocimiento como Sismología, Geodinámica, Vulcanología, Oceanografía, Climatología, Urbanismo, Sociología, Planificación, Historia, Arquitectura, Arqueología, Gobernanza, Ordenación del Territorio, etcétera.

La calidad de la geotecnología hecha revista

MAPPING is a technical- scientific publication with 31 years of history which aims to disseminate the research, projects and work done in the framework of the disciplines that make Geomatics (GIS, Cartography, Remote Sensing, Photogrammetry, Surveying, GIS, Spatial Data Infrastructure, Land Registry, Environment, etc.) applied in the field of Earth Sciences (Geophysics, Geology, Geomorphology, Geography, Paleontology, Hydrology, etc.). It is a bimonthly magazine with double-blind peer review. MAPPING is aimed at the scientific, academic and business community interested in the dissemination and teaching of Geomatics and their applications in different areas of knowledge that make up the Earth Sciences (Seismology, Geodynamics, Volcanology, Urban Planning, Sociology, History, Architecture Archaeology , Planning, etc.)

MAPPING

VOL.31 N°207 PRIMER SEMESTRE 2022 ISSN 1131-9100

DISTRIBUCIÓN, SUSCRIPCIÓN Y VENTA

eGeoMapping S.L.
C/ Arrastaría 21.
28022. Madrid. España
Teléfono: 910067223
info@revistamapping.com
www.revistamapping.com

MAQUETACIÓN

eGeoMapping S.L.

IMPRESIÓN

Podiprint

Los artículos publicados expresan solo la opinión de los autores. Los editores no se identifican necesariamente con las opiniones recogidas en la publicación. Las fotografías o imágenes incluidas en la presente publicación pertenecen al archivo del autor o han sido suministradas por las compañías propietarias de los productos. Prohibida la reproducción parcial o total de los artículos sin previa autorización y reconocimiento de su origen. Esta revista ha sido impresa en papel ecológico.



FOTO DE PORTADA:

Trabajos de campo en Cumbre Vieja, La Palma, España,

Autor: IGN-España. Iván Torres

Depósito Legal: M-14370-2015

ISSN: 1131-9100 / eISSN: 2340-6542

Los contenidos de la revista MAPPING aparecen en: Catálogo BNE, CIRC, Copac, Crue- Red de Bibliotecas REBIUN, Dialnet, DULCINEA, EBSCO, GeoRef, Geoscience e-Journals, Gold Rush, Google Académico, ICYT-CSIC, IN-RECS, Latindex, MIAR SHERPA/RoMEO, Research Bible, WorldCat.

PRESIDENTE

Benjamín Piña Patón

DIRECTOR

Miguel Ángel Ruiz Tejada
maruiz@egeomapping.com

REDACTORA JEFA

Marta Criado Valdés
mcriado@egeomapping.com

CONSEJO DE REDACCIÓN

Julián Aguirre de Mata
ETSITGC. UPM. Madrid

Manuel Alcázar Molina
UJA. Jaén

Marina A. Álvarez Alonso
ETSII. UPM. Madrid

Gersón Beltrán
FGH. UV. Valencia

Carlos Javier Broncano Mateos
Escuela de Guerra del Ejército. Madrid

José María Bustamante Calabuig
Instituto Hidrográfico de la Marina. Cádiz

Antonio Crespo Sanz
Investigador

Efrén Díaz Díaz
Abogado. Bufete Mas y Calvet. Madrid.

Mercedes Farjas Abadía
ETSITGC. UPM. Madrid

Carmen Femenia Ribera
ETSIGCT. UPV. Valencia

Javier Fernández Lozano
ESTMinas. Ule. León

M^a Teresa Fernández Pareja
ETSITGC. UPM. Madrid

Carmen García Calatayud
Biblioteca Nacional de España

Florentino García González
Abogado

Diego González Aguilera
EPSA. USAL. Salamanca

Álvaro Mateo Milán
CECAF. Madrid.

Israel Quintanilla García
ETSIGCT. UPV. Valencia

Antonio Federico Rodríguez Pascual
Revisor de estilos

Pilar Sanz del Río
URBASANZ Estudio Jurídico S.L.

Roberto Rodríguez-Solano Suárez
EUITF. UPM. Madrid

Andrés Seco Meneses
ETSIA. UPNA. Navarra

Cristina Torrecillas Lozano
ETSI. US. Sevilla

Antonio Vázquez Hoehne
ETSITGC. UPM. Madrid

Jesús Velasco Gómez
ETSITGC. UPM. Madrid

CONSEJO ASESOR

Ana Belén Anquela Julián
ETSICT. UPV. Valencia

Maximiliano Arenas García
Acciona Infraestructuras. Madrid

José Juan Arranz Justel. ETSITGC. UPM.
Madrid

César Fernando Rodríguez Tomeo
IPGH. México

Ignacio Durán Boo
Ayuntamiento de Madrid

Francisco Javier González Matesanz
IGN. Madrid

Ourania Mavrantza
KTIMATOLOGIO S.A. Grecia

Julio Mezcuá Rodríguez
Fundación J. García-Siñeriz

Ramón Mieres Álvarez
TOPCON POSITIONING SPAIN. Madrid

Benjamín Piña Patón
Presidente

Calidad Funcional: un nuevo enfoque sobre la calidad de datos

Functional Quality: a new approach to data quality

Francisco Javier Ariza López, Juan Francisco Reinoso Gordo, José Luis García Balboa, Antonio Federico Rodríguez Pascual

REVISTA **MAPPING**
Vol. 31, 207, 04-14
Año 2022
ISSN: 1131-9100

Resumen

En este trabajo se reflexiona sobre la calidad de datos geoespaciales y sobre cómo el paradigma actual, datocéntrico, puede ser superado mediante la consideración de casos de uso genéricos que vinculen los datos geoespaciales con su procesado (algoritmos). De esta forma, se propone una nueva aproximación a la calidad de los datos geoespaciales que supone una situación intermedia entre el extremo datocéntrico, adoptado hasta la fecha por los productores como única perspectiva viable, y el extremo usocéntrico propio de los usuarios, y que probablemente resulta inabordable. Como apreciación de la calidad en medio de esos dos extremos se propone la calidad funcional. En este artículo se define ese concepto y se ofrecen algunas directrices para abordarlo.

Abstract

This paper reflects on the quality of geospatial data and how the current data-centric paradigm can be overcome by considering generic use cases that link geospatial data with its processing (algorithms). In this way, a new approach to the quality of geospatial data is proposed that assumes an intermediate situation between the data-centric extreme, adopted to date by the producers as the only viable perspective, and the user-centric extreme of the users, which is probably unapproachable. As an appreciation of quality in the middle of these extremes, the functional quality is proposed and defined and some guidelines are offered to address it.

Palabras clave: Calidad de datos, Adecuación al uso, ISO 19157, Evaluación de la calidad, Calidad funcional

Keywords: Data quality, Fitness for use, ISO 19157, Quality evaluation, functional quality.

Francisco Javier Ariza López
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén
fjariza@ujaen.es
Juan Francisco Reinoso Gordo
Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica y en la Ingeniería, Universidad de Granada
jreinoso@ugr.es
José Luis García Balboa
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, Universidad de Jaén
jjbalboa@ujaen.es

Antonio Federico Rodríguez Pascual
Centro Nacional de Información Geográfica de España
afrodriguez@fomento.es

Recepción 12/02/2022
Aprobación 16/03/2022

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de calidad es algo cercano a todos, se utiliza en el lenguaje coloquial y es universalmente entendido y aceptado intuitivamente. No obstante, no es novedoso, ya que la preocupación por la calidad está presente en las sociedades desde hace muchos siglos, aunque su formalización precisa y matemática sea relativamente reciente. En general, se puede decir que una obra bien hecha tiene calidad o es de calidad. Una definición extendida es «propiedad o conjunto de propiedades inherentes a una cosa, que permiten apreciarla como igual, mejor o peor que las restantes de su especie» (DRAE, 1992). Esta definición aclara que la calidad no tiene por qué limitarse a una única propiedad del objeto que se considera, sino que pueden ser varios factores los que entren en juego para definir la calidad. Por otra parte, lo inherente es lo propio o inseparable de las cosas, y aquí cabe matizar que dentro de lo inherente hay factores que son más evidentes, o explícitos, que otros que poseen un carácter más implícito. Otro aspecto de interés de esta definición es el que hace referencia a que la calidad debe ser apreciada y comparada. Esto significa que cada individuo podrá tener una apreciación distinta, por lo que la calidad hay que entenderla como algo subjetivo. Finalmente, la definición indica que se utiliza la comparación para valorarla, y ello significa la necesidad de patrones para comparar, es decir, patrones de medición.

Por otro lado, interesa definir qué es la adecuación al uso. Si acudimos al glosario sobre calidad de la Asociación Estadunidense para la Calidad (ASQ, *American Society for Quality*) (<https://asq.org/quality-resources/quality-glossary/f>), nos indica que la adecuación al uso (*fitness for use*) es un «término que a veces se utiliza para definir el término “calidad”, para indicar el grado en que un producto o servicio cumple los requerimientos para el uso previsto». Si acudimos a la plataforma OBP (*Online Browsing Platform*) de ISO, no existe una entrada directa para este término, aunque como entrada relacionada aparece «test o prueba de usabilidad», que se define como «prueba para determinar si un sistema implementado cumple su propósito funcional según lo determinado por sus usuarios». Utilizar la adecuación al uso implica tener bien determinado el uso de un sistema y evaluar su nivel de adecuación, aspectos ambos que suelen resultar ciertamente complejos. En el fondo, un caso de uso no es más que la descripción de una acción o actividad con un cierto nivel de formalización (p.ej. utilizando diagramas UML, o cualquier otro lenguaje). Centrado en un requerimiento de usuario específico, la documentación de un caso de uso ha de incluir los actores, acciones, entradas, salidas y decisiones necesarias para lograr una meta. La adecuación al uso supone la pérdida de la visión más trascendente, abstracta y general de la calidad para centrarnos en casos de

uso concretos. Por ejemplo, en el sector automovilístico, son muchos los posibles usuarios, usos y formas de conducir un modelo de vehículo concreto y, por ello, al considerar que el consumo de combustible es un aspecto relevante de su calidad, y que es imposible informar adecuadamente para todas las posibles casuísticas, se han adoptado estándares como el NEDC (*New European Driving Cycle*) (EU, 2007), y más reciente el estándar WLTP (*World Harmonized Light-duty Vehicle Test Procedure*) (EU, 2017). En este último se adopta una dinámica de conducción que intenta reproducir mucho mejor cómo conducen las personas en el mundo real (DGT, 2020). Lo anterior nos permite considerar que, una vez establecido un caso de uso concreto, el análisis de la adecuación del producto a ese caso de uso, aún sin perder complejidad, se simplifica bastante, gracias a las restricciones propias establecidas en el estándar de evaluación del caso de uso considerado.

Este trabajo tiene por objetivo desarrollar una nueva perspectiva de la calidad de los datos geoespaciales, en la que nos guiamos por el ejemplo expuesto anteriormente para el caso automovilístico. Denominamos calidad funcional a esta nueva perspectiva.

La organización del documento es la siguiente: tras esta introducción, en el apartado siguiente se realiza una justificación más amplia de la necesidad de esta nueva aproximación; posteriormente, se formula qué es la calidad funcional y su relación con la calidad desde la perspectiva del productor y la adecuación al uso; a todo lo anterior le sigue la discusión, centrada tanto en aspectos conceptuales como prácticos, y el documento finaliza con unas conclusiones generales.

2. DETECTANDO LA NECESIDAD DE UNA NUEVA APROXIMACIÓN AL CONCEPTO DE CALIDAD

Desde la perspectiva de este trabajo, nos interesan el enfoque centrado en el producto (la calidad puede ser apreciada en él) y el enfoque centrado en el usuario (el usuario puede valorar la calidad en función de sus necesidades y expectativas). La Figura 1 presenta lo que ISO 19157 denomina el marco de los conceptos de la calidad de datos. Se trata de un esquema en el que aparecen los roles de productor y usuario, y su relación con la realidad, los datos y la calidad. Si bien la figura presenta una situación simétrica, realmente no es así. Pensemos en un productor (p.ej. el IGN o el IECA) que genera un producto de datos por medio de unas especificaciones que pretenden satisfacer unas necesidades (parte izquierda de la figura). Sin embargo, en relación al usuario (parte derecha de la figura), la realidad es que son

muchos los posibles usuarios, que tendrán necesidades y bagajes muy distintos y, por tanto, requerimientos diferentes, pero que, sin embargo, utilizan el mismo conjunto de datos generado por el productor. Por tanto, dado que pueden existir múltiples usos de un mismo producto, existirán tantas adecuaciones al uso como posibles usos, y tantas apreciaciones de la calidad como usuarios. Sin embargo, el productor, al diseñar el producto con un propósito concreto y al establecer sus especificaciones, evalúa la calidad desde una perspectiva generalmente distinta a la de los usuarios. Aun así, entre la perspectiva del productor y la del total de usuarios existirá una zona común, que será más amplia en el caso de productos con buenos diseños. La zona disjunta entre ambas perspectivas procede de los usos no pretendidos. El riesgo de estos usos será tanto mayor cuanto menos entiendan los usuarios los datos con los que intentan trabajar, y cuanto más alejados estén los dominios semánticos del producto y de la aplicación pretendida. Por tanto, entender la adecuación al uso es fundamental para entender también el carácter relativo de la calidad.

2.1. Calidad de datos como adecuación al uso

De una forma sencilla, la calidad de la información se

puede definir como el grado en que se puede considerar una fuente fiable para un uso requerido (McGilvray, 2008). Para Redman (2013) los datos son de calidad si son adecuados para su utilización en operaciones, toma de decisiones y planificación, es decir, cuando están libres de defectos y poseen las características apropiadas para completar las operaciones, tomar decisiones o hacer planes. Esta perspectiva coincide con la de Olson (2003), que indica que los datos son de calidad si satisfacen los requerimientos del uso pretendido (adecuación al uso), lo que, por otra parte, viene a indicar que la calidad de los datos depende mucho más del uso pretendido que de los propios datos. Como consecuencia de lo anterior, bajo ciertos usos no pretendidos inicialmente, unos datos supuestamente buenos pueden llegar a ser considerados como malos. Dado que para un mismo conjunto de datos (p.ej. un modelo digital de elevaciones, MDE) pueden ser muchos los usuarios y usos perseguidos, evaluar la adecuación al uso se convierte en una tarea muy compleja, por no decir inabordable en la práctica. Lo anterior, lleva a la necesidad de establecer un marco más restrictivo y establecer la calidad de manera más específica. Así, en ISO 8000-2 (ISO 2020) se define la calidad de los datos como el grado en que un conjunto de características inhe-

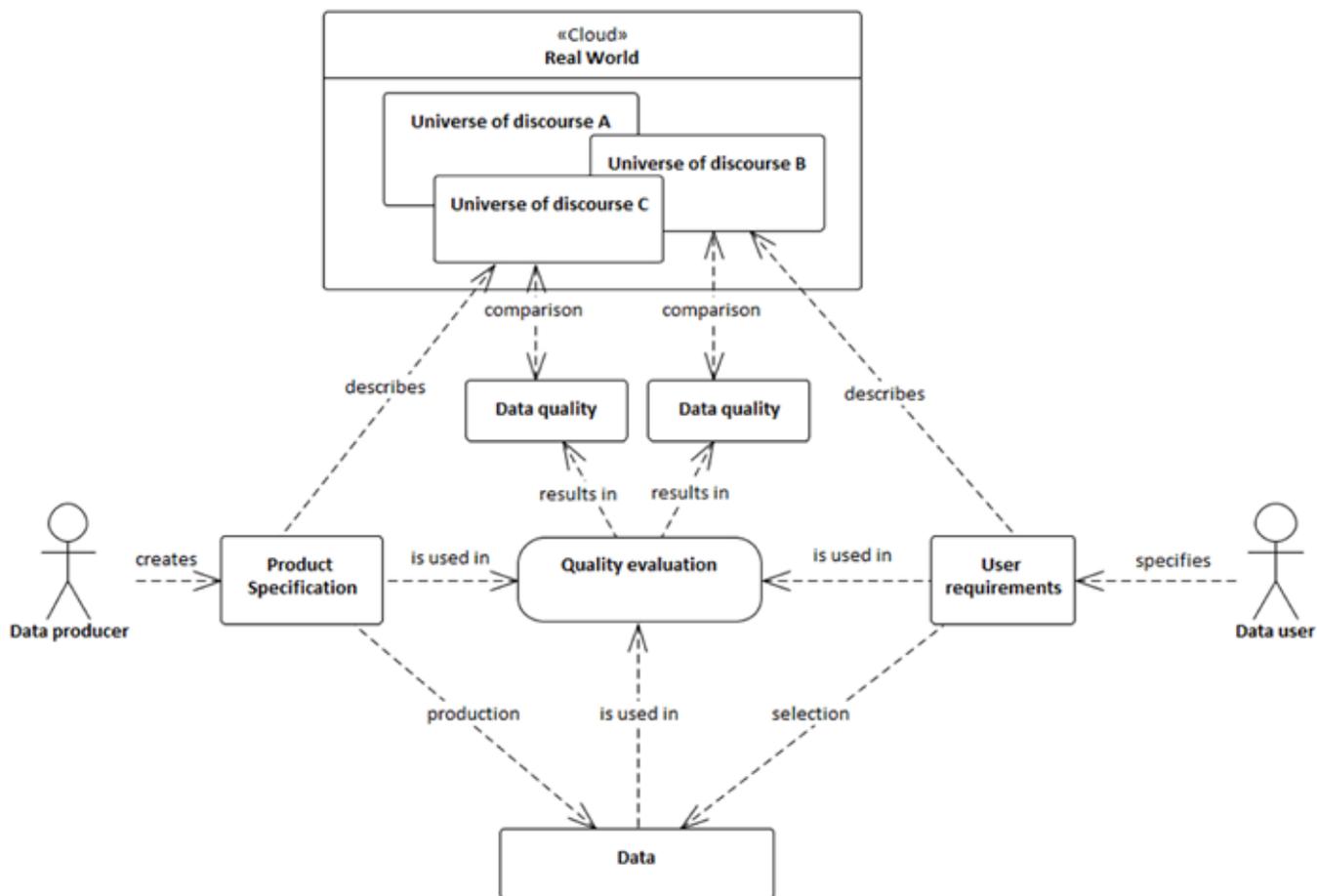


Figura 1. Marco de los conceptos de calidad de datos (ISO 19157:2013)

rentes de los datos satisface unos requisitos, mientras que ISO/IEC 25012 (ISO, IEC 2008) es más explícita e indica que es el grado en que las características de los datos satisfacen las necesidades especificadas e implícitas, cuando se usan bajo unas condiciones determinadas. Sin embargo, como indican Devillers y Bear (2006), la evaluación de la calidad con la perspectiva de adecuación al uso puede resultar una tarea extremadamente compleja, incluso para expertos. Es más, como ya indicaba Veregin (1999), si bien el concepto de adecuación al uso tiene décadas, prácticamente no ha existido evolución ni avances en métodos para evaluar la adecuación al uso de datos y modelos frente a aplicaciones geográficas específicas. Más recientemente, De Bièvre (2010) indica que, durante años, la adecuación al uso ha sido un estándar en la literatura (química), pero una cuantificación de tal «aptitud» se ha descuidado o evitado por completo. De esta forma, para Vasseur y col (2006), este tipo de evaluación permanece en las manos del usuario.

2.2. La calidad intrínseca de los datos

Si bien la perspectiva relativista de la calidad que conlleva la adecuación al uso es común y está bastante generalizada (Illari, 2014), se sigue considerando que existen aspectos de la calidad que son independientes del propósito, que se denominan inherentes o intrínsecos. Según Lee y col. (2002) la calidad intrínseca implica que la información tiene calidad por derecho propio. Para English (1999), la calidad inherente es el grado en que los datos reflejan fielmente el objeto del mundo real que representan. De esta forma, puede ocurrir que un conjunto de datos tenga una gran calidad intrínseca, que sea la causa de una mala calidad desde el punto de vista de la adecuación al uso. Por ejemplo, un gran nivel de detalle en una representación muy fidedigna de un objeto podría impedir un procesado ágil requerido en un caso de uso por un usuario (p.ej. nube de puntos con demasiada densidad).

El modelo de calidad de datos geoespaciales que se propone en ISO 19157 (ISO 2013) se centra básicamente en los aspectos inherentes o intrínsecos de la calidad, lo cual es la posición más cómoda para los productores. En ese mismo modelo, mediante el elemento denominado usabilidad, se abre la adecuación al uso, si bien su aplicación está muy poco extendida. Una limitación añadida para estos desarrollos ha sido que ISO 19157, en su versión de 2013, impide el establecimiento de nuevos elementos de la calidad, aspecto que parece superado con la versión nueva que actualmente está en ciernes de ser aprobada.

Dado que los datos geoespaciales son datos, se puede considerar que los aspectos fundamentales que definen su calidad son los exigibles, de manera general, a cualquier tipo de datos: exactitud, adecuación temporal, relevancia, completión, etc. (Olson, 2003). En el ámbito geoespacial,

la calidad deseada de los productos de datos se establece en unas especificaciones (ISO 19131) y la calidad real es evaluada por los productores oficiales de esos datos desde su propia perspectiva, en la mayoría de los casos. Se informa de ella por medio de metadatos y de un informe de calidad independiente. Es la norma internacional ISO 19157 la que establece el marco para describir y evaluar la calidad de los datos geoespaciales, en el que se consideran diversas componentes de la calidad (p.ej. exactitud posicional, exactitud temática, completión, consistencia lógica) por medio de los denominados elementos de la calidad (p.ej. exactitud posicional absoluta o relativa para la exactitud posicional, omisión y comisión para el caso de la completión, etc.).

2.3. Los usuarios comprenden la calidad de forma diferente al productor

Un aspecto que tampoco se puede obviar respecto a la calidad de los datos es el entendimiento que tienen de ella los usuarios. La forma actual de abordar el tema de la calidad y su transmisión a los usuarios no es adecuada; está lejos de la comprensión de los usuarios y de la adecuación al uso (Boin y Hunter, 2009), lo que significa que se necesita un mejor conocimiento de los dominios de aplicación (p.ej. ingeniería civil, agronomía, hidrología, etc.) y de los casos de uso. Por ejemplo, Devillers et al. (2005) argumentan que la mayoría de los parámetros que se utilizan para expresar la calidad se centran en las características relacionadas con la producción de datos (calidad interna), y que es necesario incluir más información para lograr el propósito de permitir juzgar la adecuación al uso. En ese sentido, Boin y Hunter (2009) se preguntan: «¿Los usuarios de datos espaciales realmente comprenden la información sobre la calidad de los datos?» y «¿qué información comunica calidad al consumidor de datos espaciales?». En relación con la primera pregunta, proponen el uso de terminología propia del usuario de datos en lugar de la de los productores, que es demasiado técnica y específica de la industria, y la necesidad de enfocar la información de calidad en describir la idoneidad y confiabilidad del producto en lugar del método de producción. En relación con la segunda pregunta, concluyeron que está fuertemente afectada por el contexto.

Elijamos un ejemplo de datos geoespaciales de estructura especialmente simple, muy extendida y bien conocida: los datos de MDE en malla. La descripción de la calidad de los datos de MDE realizada por los productores suele restringirse a dar los valores de resolución (paso de malla o tamaño de celda, según el caso), y de los errores altimétricos (p.ej. por medio del RMSE o de la desviación estándar). Esta perspectiva es la que domina la calidad interna, pues es la que se deriva directamente de las normas (p.ej. ISO 19157). Dado su interés aplicado, existen algunos estudios que abordan el tema de una mejor comprensión de la calidad de los MDE

por parte de los usuarios. Por ejemplo, Wechsler (2003) exploró las percepciones de los usuarios sobre la incertidumbre, Podobnikar (2009) propuso algunas herramientas para la evaluación de la calidad visual y Darnell et al. (2008) presentaron una herramienta para facilitar el acceso y la aplicación del análisis de incertidumbre a los usuarios. Recientemente, Mesa-Mingorance et al. (2016) han analizado los usuarios y usos de algunos productos DEM oficiales en España. Ese documento ha identificado los perfiles y usos predominantes de los usuarios, y presenta una evaluación de la utilidad de los productos por los usuarios. Tarquini y Nannipieri (2017) resumen cuatro años de difusión y uso gratuitos de un MDE de 10x10 metros que cubre Italia en su totalidad, y presentan una visión completa de las áreas de uso y algunas observaciones sobre la idoneidad de ese producto para aplicaciones específicas. Por otro lado, los productores desean que los usuarios tengan una mejor comprensión de sus productos y han creado guías de usuario para los productos MDE (p.ej. OS, 2013; ICSM, 2008) y metadatos electrónicos. Pero eso no es adecuación al uso. La adecuación al uso se menciona en varios estudios (p.ej., Lemmens 1999, Fisher y Tate, 2006), y está claro que sólo se puede evaluar en relación con un uso previsto (Devillers et al., 2002), pero la literatura sobre casos de uso prácticos es casi inexistente. Ariza-López y col. (2018) recogen algunos casos de uso encontrados en la fase de revisión de su trabajo, pero estos casos presentan muy diverso grado de formalización y adolecen de un esquema común.

2.4. La información se procesa y esto afecta a su calidad

Un aspecto relevante que afecta a todo tipo de datos, y de una forma peculiar y específica a los datos geoespaciales, es su procesado. Por ejemplo, a partir de un MDE se pueden obtener modelos de pendientes, orientaciones, una red de drenaje, etc. En ese sentido, son muchas las operaciones realizadas por los sistemas de información geográfica (SIG) las que se podrían considerar y, además, numerosos los algoritmos que pueden existir para llevar a cabo cualquiera de ellas. Por ejemplo, siguiendo con el caso de los MDE, dentro de la herramienta SAGA de procesado SIG se ofrecen seis opciones para el cálculo de cuencas aportadoras: determinístico a ocho vecinos (O'Callaghan y Mark 1984), determinístico infinito (Tarboton 1997), Rho 8 (Fairfield y Leymarie 1991), múltiples direcciones de flujo (Freeman 1991), múltiples direcciones de flujo triangular (Seibert y McGlynn 2007) y modelo de relieve de Braunschweiger (Bauer y col 1985). Lo mismo ocurre para otras muchas variables derivadas de un MDE. Por ejemplo, para la pendiente podríamos considerar su cálculo usando cuatro vecinos (Fleming y Hoffer 1979), ocho vecinos (Horn 1981), ocho vecinos ponderado por la distancia o con igual peso (Sharpnack y Akin 1969), por

medio de cuatro triángulos (Mathur 1989). Guth (1995) y Hodgson (1998) presentan una comparación de algunas de estas opciones. Otro caso similar en cuanto a las numerosas opciones existentes, que se relaciona directamente con la determinación de cuencas y redes, es el procesado de depresiones o pozos; aquí podemos citar, entre otras, las propuestas de Jenson and Domingue (1988), Hutchinson (1989), Martz and Garbrecht (1998) y Planchon and Darboux (2002).

Las herramientas SIG suelen ofrecer sus algoritmos sin mayor ayuda al usuario sobre la calidad de los resultados, de tal manera que es éste quien debe tomar la decisión sobre cuál aplicar y con qué parámetros. Esto es así pues consideramos que se conoce poco sobre el comportamiento real de los algoritmos desde la perspectiva de sus resultados, y de su adecuación a situaciones concretas (p.ej. tipo de orografía en los casos anteriores). Indudablemente, existen trabajos que evalúan algunos de estos procesos. Por ejemplo, en cuanto a la determinación de la pendiente, Tang y Pilesjö (2011) evalúan ocho algoritmos en tres tipologías concretas de terrenos, Dunn y Hickey (1998) evalúan cuatro algoritmos con datos escasos, y de una forma aún más aplicada, Hickey (2000) analiza la repercusión de algunos algoritmos de determinación de la pendiente en el cálculo de la erosión por medio de la ecuación universal de pérdida de suelo. Para el caso de la determinación de cuencas existen trabajos de revisión centrados en aspectos algorítmicos (p.ej. Romero-Zaliz y Reinoso-Gordo, 2018) y otros más aplicados como el trabajo de Baker y col (2006). Este último trabaja sobre cuatrocientas veinte cuencas comparando cuatro métodos de delimitación automática de cuencas (quemado de cauce, excavación normalizada, reacondicionamiento de superficies y reacondicionamiento normalizado), frente a una delimitación manual, y analizan los resultados desde las perspectivas de la superficie delimitada y de la afectación de las estimaciones de descargas de nutrientes. Jankowsky y col (2013) analizan siete métodos de delimitación de cuencas y encuentran diferencias en superficie de las cuencas delineadas que llegan hasta el 25% del área. A pesar de estos, y otros trabajos en la misma línea, consideramos que las aportaciones son escasas, dispersas y la mayoría de las veces poco comparables. Como se indica en Ariza-López y col (2017) hacen falta conjuntos de datos de prueba para que se ofrezca un entorno común y más estandarizado a la hora de comparar los resultados de las pruebas de diferentes algoritmos. En un contexto propio de la generalización cartográfica, Beard (1989) resalta la importancia del error de uso como la componente del error más olvidada y ciertamente, la falta de conocimiento sobre la calidad de los algoritmos es una componente del error que está siendo olvidada casi de continuo.

2.5. Acercando los productores a los usuarios: la calidad funcional

Por todo lo anterior, y en coincidencia con otros autores (p.ej. Wechler 2003, etc.), consideramos que existe por parte de los usuarios una falta de entendimiento y uso de la información que les es ofrecida por los productores sobre la calidad de los datos debido a las numerosas limitaciones del marco actual y a la manera en que se aplica. Por ello, en este trabajo se propone una nueva forma de abordar la evaluación e informe de la calidad más cercana a los usuarios. Esta nueva forma la denominamos calidad funcional y está directamente vinculada a la adecuación al uso, por medio de la definición de casos de uso que se han de aplicar al conjunto de datos de interés. Por tanto, el objetivo de este trabajo es proponer esta nueva forma, definiendo qué es la calidad funcional, y estableciendo los elementos necesarios para poder abordarla: definición de caso de uso, establecimientos de características de calidad y de los métodos de evaluación.

3. DEFINIENDO LA CALIDAD FUNCIONAL

En este apartado se presenta un nuevo nivel de análisis e información sobre la calidad de los datos geospaciales, al que denominamos calidad funcional. Adjetivamos la calidad con el término «funcional» porque lo que se propone es evaluar cómo de bien «funcionan» los datos en casos de uso genéricos. Por casos de uso genéricos nos referimos a los que implican utilizar capacidades SIG, pero sin un contexto de aplicación concreto. Algunos casos de uso genéricos indicados en la bibliografía para el caso de MDE son: determinación de alturas, cálculo de pendientes, cálculo de orientaciones, delineación de redes de drenaje, análisis de visibilidad y determinación de cuencas aportadoras. Estos casos coinciden plenamente con capacidades SIG de las herramientas más comunes, pero podrían ser otros más complejos, aunque de manera algo simplificada (p.ej. cálculo del hietograma bajo ciertos supuestos). Se puede observar que el caso de uso a considerar no se completa o complementa con nada (son genéricos), es decir, por ejemplo, no se indica cálculo de pendientes «para la determinación de la erosión», simplemente se focaliza en lo sustancial, la determinación de la pendiente.

Por tanto, este nuevo nivel de evaluación e información sobre la calidad recoge el hecho de que los datos geospaciales se utilizan en procesos, vinculando datos con algoritmos para considerar de manera más completa la calidad de los resultados, que es lo que afecta más directamente a los usuarios. Así, definimos la calidad funcional como la

consistencia, frente a una referencia, de los resultados generados por un algoritmo determinado habitualmente será el considerado mejor por la comunidad de usuarios o el más utilizado al aplicarlo al conjunto de datos geospaciales que se está considerando (p.ej. un producto MDE que se utiliza para la determinación de una red hidrográfica).

El algoritmo elegido debe estar directamente relacionado con el caso de uso genérico en el que se va a trabajar (p.ej. derivación de pendientes, de red de drenaje, de cuenca aportadora, etc.), Además, para conseguir una buena especificación del caso de uso genérico por el productor, no sólo se debe indicar explícitamente el algoritmo que se aplica (y herramienta de *software*, si es necesario), sino también sus parámetros de control, si existen, y ofrecer una referencia válida para su consulta. Un ejemplo será el de un MDE sobre el que se aplique un algoritmo concreto, con determinados valores de sus parámetros de control, que derive una red de drenaje, que se comparará con una red de drenaje de referencia. Para la referencia se deben adoptar las mismas exigencias que en una evaluación de la calidad convencional: representatividad, independencia y mayor exactitud.

Esta nueva perspectiva de la calidad puede ser compleja, ya que todo está contextualizado por la utilidad de los resultados (p.ej. para análisis estadísticos de superficies, para análisis y simulaciones sobre redes de drenaje, etc.), lo que implicará requerir varios índices para cuantificarla e informar sobre ella. Por ejemplo, para el caso de una red de drenaje derivada de la aplicación de un algoritmo concreto sobre un MDE, algunos aspectos que pueden ayudar a informar sobre la calidad funcional del MDE son: desplazamientos de la red resultante, compleción de la red obtenida, problemas topológicos presentes en la red final, etc. Es decir, aspectos que pueden interesar a un usuario que utilizará esa red de drenaje en sus procesos de producción o toma de decisiones.

Por tanto, la calidad funcional:

- Es una aproximación a la adecuación al uso. Hablamos de aproximación porque el caso de uso en que está centrada es considerado como genérico y, por tanto, no estará definido por exigencias particulares de unos usuarios u otros (p.ej. para un proyecto de ingeniería las exigencias de resolución son distintas para las fases de estudio de viabilidad, anteproyecto y proyecto).

- Es la capa intermedia de un sistema de tres capas, cada una de las cuales nos acercan a la calidad desde una perspectiva distinta. La Figura 2 presenta un resumen de esta idea, donde la calidad funcional es la capa intermedia (capa 2) entre la evaluación tradicional (capa 1) realizada por el productor con parámetros casi exclusivamente de exactitud posicional (Mesa-Mingorance y Ariza-López, 2020), y la adecuación al uso propia de un usuario con unos condicionantes concretos para su aplicación (capa 3). De esta forma, se evita el problema de los incontables usuarios y condiciones

concretas de sus aplicaciones, lo que supone un contexto demasiado rico y amplio como para poder ser abordado. En el fondo, estamos siguiendo el mismo esquema que se ha mencionado en el apartado 1 para el caso del sector automovilístico respecto a la información del consumo de los vehículos.

Por tanto, los productores no sólo deberán hacerse cargo de la capa 1 (calidad interna) de la Figura 2, sino también de la capa 2 (calidad funcional), una vez hayan determinado cuáles son los casos de uso genéricos de interés. La información relativa a la capa 2 requerirá la mayor transparencia posible, e información pública y accesible para que el usuario esté bien informado, como se viene asumiendo para la capa 1. La propuesta que se realiza desde aquí consiste en aplicar el modelo ISO 19157 para la calidad de datos geoespaciales. De esta forma, la evaluación del caso de uso genérico se debe vincular con una o varias características relevantes, aplicadas y entendibles por los usuarios, y cada una de ellas se ha de vincular con una o varias medidas de la calidad (ver capítulo 8 de la norma). Las medidas de la calidad propuestas deberán ser evaluadas según un método prefijado, y el

resultado de todo ello debe presentarse en lo que la norma denomina informe de calidad independiente. Siguiendo las prescripciones de ISO 19157, se propone que ese informe se estructure en cuatro apartados: descripción del caso de uso considerado (indicando algoritmo, referencias, etc.); descripción de la evaluación (elemento de la calidad, medida, tolerancia, etc.); resultados de la evaluación (los que correspondan), y descripción detallada del método de evaluación.

4. DISCUSIÓN

Consideramos que antes de adoptar una nueva perspectiva conviene pensar si aporta o no ventajas respecto a la situación anterior. A nuestro modo de ver, las ventajas de trabajar con la calidad funcional son varias:

- La calidad funcional liga los datos a la esencia de los procesos (algoritmos) y a casos de uso aplicados. Todo ello posee una visión y vocación más aplicada que la calidad interna informada por los productores, que es mucho más datocéntrica, centrada en los propios datos, sin considerar su uso.

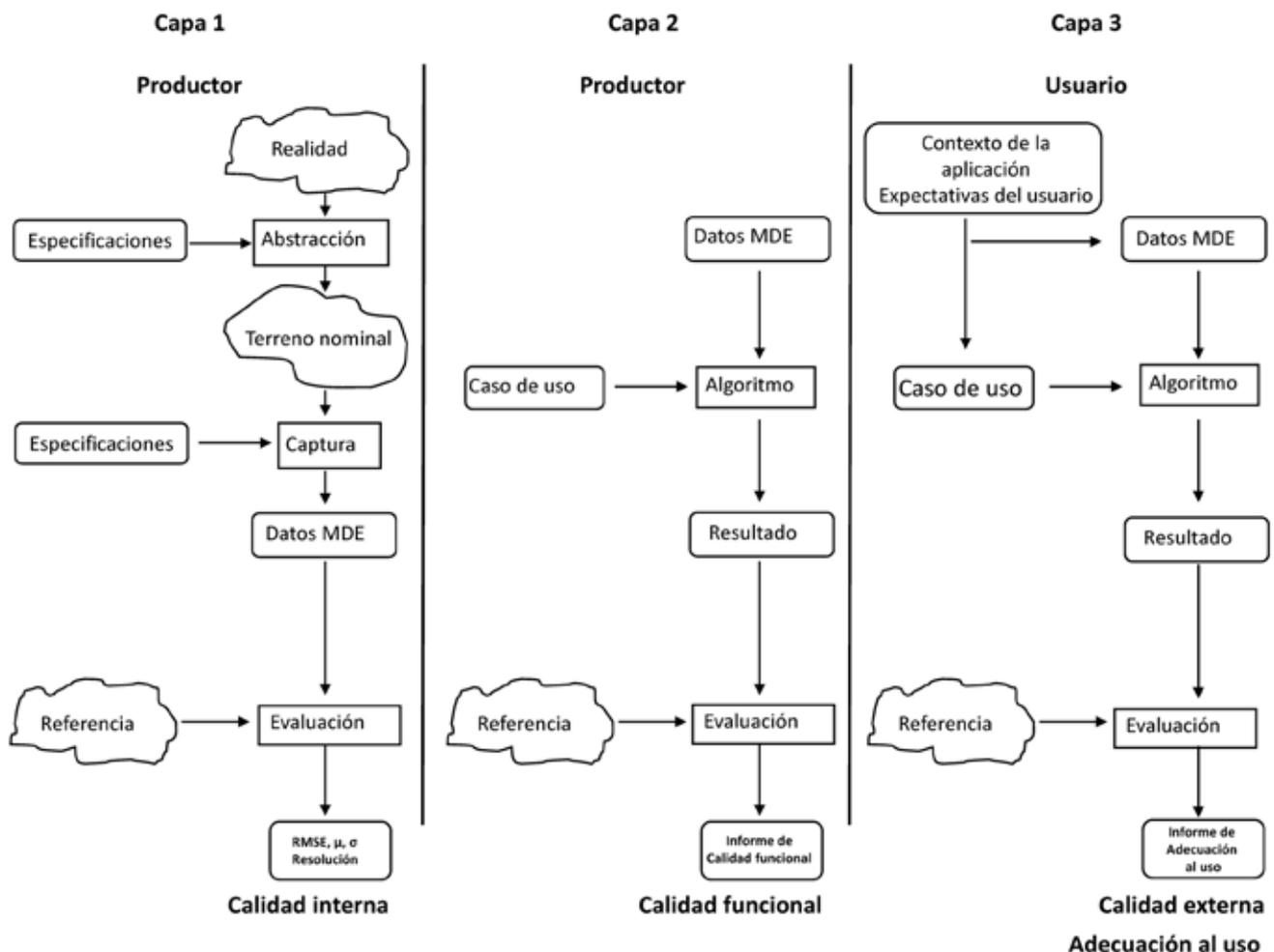


Figura 2. Modelo de tres capas relativo a la calidad

- Al quedar la calidad funcional ligada a casos de uso genéricos por medio de algoritmos, la calidad funcional elimina la incertidumbre derivada del manejo de procesos de cálculo dispares, y por ello se refiere al par: Calidad funcional = Función {conjunto de datos dado, algoritmo dado}. Es decir, siempre está presente el algoritmo como una característica propia del caso de uso genérico considerado.

- Proporciona información valiosa a los productores de datos para que puedan definir umbrales de calidad que sean sensatos, razonables y aplicados, conociendo mejor su impacto en los resultados finales.

Pero también se plantean algunos inconvenientes:

- La calidad funcional no entra en el rico contexto de la aplicación de cada usuario, por lo que no es del todo equivalente a la adecuación al uso; ofrece un estado intermedio entre los índices de calidad tradicionales y lo inabordable de evaluar la calidad para todos los contextos de usuarios. A cambio, esto permite que sí pueda ser incluida en las evaluaciones realizadas por los productores y, por tanto, sea informada en los metadatos para que los usuarios tengan una mejor apreciación, más rica e inteligible, de la calidad de los conjuntos de datos que se les ofrecen.

- Existe un cierto inconveniente, que es el generado por la diversidad de algoritmos para un mismo caso de uso genérico. Esto es un *handicap*, pues los usuarios podrán utilizar cualquier de ellos. Pero dado que las herramientas SIG más extendidas forman un conjunto limitado, y que hay algunas librerías de uso muy extendido, se podría pensar en informar sobre la calidad funcional recurriendo a los algoritmos más populares entre los usuarios que están incluidos en las referidas herramientas.

- Si se duda entre varios algoritmos para un mismo caso genérico, realmente no se sabe qué algoritmo es mejor, bajo qué circunstancias y qué valores de parámetros de control son los más adecuados (si existen tales parámetros). De cualquier manera, dado que para la evaluación se requiere una referencia adecuada, la evaluación de diversos algoritmos podría realizarse respecto a esa misma referencia sin demasiado coste adicional. Consideramos que estos inconvenientes no menoscaban la utilidad de la calidad funcional, dado que con ella también se pone el foco en un aspecto, la calidad de los procesamientos, que siempre ha sido un punto débil en el entorno SIG.

En cualquier caso, esta manera de informar es una llamada de atención a aquellos usuarios que no prestan demasiada atención a los algoritmos de procesado y que consideran que todo resultado digital es bueno por sí mismo. También es una llamada de atención a los productores para conocer mejor qué aplicaciones tienen sus productos de datos. En general, permitirá introducir más transparencia y entendimiento a la hora de comparar datos y los resultados de sus procesados.

5. CONCLUSIONES

La principal aportación de este trabajo es conceptual y se ha centrado en justificar la necesidad de introducir un nuevo nivel de evaluación de la calidad, la calidad funcional, que resulte más informativo para los usuarios pero que no impida que pueda ser aplicado por los productores. Este nuevo nivel de evaluación es intermedio entre la calidad, como es entendida y materializada actualmente por los productores, y la calidad en el entorno de aplicación, que es lo que realmente interesa al usuario. La calidad funcional puede ser desarrollada sin problemas sobre el marco de ISO 19157, siempre que se permita la definición de nuevos elementos y medidas de la calidad, aspecto que parece será posible con la nueva versión de ISO 19157 que está pendiente de aprobación. Además, su aplicación requiere la especificación formal de casos de uso genéricos, y la posible utilización conjunta de varias medidas para definir adecuadamente la complejidad del caso de uso. La calidad funcional vincula los datos geoespaciales con sus procesados, por lo que ofrece una forma mucho más cercana a los usuarios y puede ayudar a los productores a estar más atentos a las necesidades de aquellos.

Este trabajo tan sólo presenta la idea de qué es la calidad funcional y del porqué de su necesidad. Pensando en un futuro próximo, se seguirá trabajando en esta línea para desarrollar ejemplos completos que puedan ser ilustrativos de cómo abordarla de una manera aplicada y mostrar más explícitamente las ventajas de su utilización.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el proyecto «Calidad funcional en modelos digitales de elevaciones en ingeniería» (https://coello.ujaen.es/investigacion/web_giic/funquality4dem/) gracias a la ayuda concedida por la Agencia Estatal de Investigación PID2019-106195RB-I00/AEI/10.13039/501100011033.

REFERENCIAS

- alphaBeta (2017). the economic impact of geospatial services: how consumers, businesses and society benefit from location-based information. https://alphabetabeta.com/wp-content/uploads/2017/09/GeoSpatial-Report_Sept-2017.pdf [19/11/2021]
- Ariza-López FJ, Chicaiza Mora EG, Mesa Mingorance JL, Jianhong Cai, Reinoso Gordo JF (2018). ADEMs: An Approach to Users and Uses from the Quality Perspective. *International Journal of Spatial Data Infrastructures Research*, 2018, Vol.13, 131-171

- Special Section: INSPIRE (Full Research Article).
- Ariza-López FJ, Reinoso-Gordo JF, García-Balboa JL, Ariza-López IA (2022). Quality specification and control of a point cloud from a TLS survey using the ISO 19157 framework, the Ariza Bridge case. *Automation in Construction*, 140 (104353). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104353>.
- Ariza-López, FJ (2002). *Calidad en la Producción Cartográfica*. Editorial Ra-Ma, Madrid.
- Batini, C., Scannapieco, M. (2016). *Data and information quality. Dimensions, Principles and techniques*. Springer.
- Bauer, J., Rohdenburg, H., Bork, H.-R. (1985). En *Digitales Reliefmodell als Voraussetzung fuer ein deterministisches Modell der Wasser und Stoff-Fluesse, Landschaftsgenese und Landschaftsoekologie*, H.10, Parametereaufbereitung fuer deterministische Gebiets-Wassermodelle, *Grundlagenarbeiten zu Analyse von Agrar-Oekosystemen*, (Eds.: Bork, H.-R. / Rohdenburg, H.), p.1-15
- Beard M.K., "Use error: the neglected error component", *Proc. Auto-Carto 9*, 1989, Baltimore, USA, ACSM-ASPRS, p 808417.
- Boin A.T., Hunter G.J. (2009). What communicates Quality to the spatial Data Consumer?. En Stein A, Shi W, Bijker W (2009). *Quality aspects in Spatial Data Mining*. CRC Press.
- Darnell, A.R. N.J. Tate and C. Brunson (2008). Improving user assessment of error implications in digital elevation models. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32 (4):268-277.
- De Bièvre, Paul. (2010). 'Fitness-for-intended-use' is an important concept in measurement. *Accreditation and Quality Assurance* 15, 545-546. [10.1007/s00769-010-0696-3](https://doi.org/10.1007/s00769-010-0696-3).
- Devillers, R., Beard K (2006). Communication and use of spatial data quality information in GIS. En Devillers, R. y Jeansoulin, R. (Ed). *Fundamental of Spatial Data quality*. GIS Series ISTE.
- Devillers, R., Gervais, M., Bédard, Y. and R. Jeansoulin (2002), "Spatial Data Quality: From Metadata to Quality Indicators and Contextual End-User Manual". *Proceedings of OEEPE/ISPRS Joint Workshop on Spatial Data Quality Management*, March 21-22, 2002, Istanbul. pp. 45-55
- Devillers, R., Yvan, B., Jeansoulin, R. (2005). *Multidimensional Management of Geospatial Data Quality Information for its Dynamic Use Within GIS*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (PE&RS). 71. 205-215. [10.14358/PERS.71.2.205](https://doi.org/10.14358/PERS.71.2.205).
- DGT (2020): *Nuevas mediciones, consumos más reales*. <https://revista.dgt.es/es/motor/reportajes/2020/1217-WLTP.shtml> [accedido 18/11/2021]
- Dunn M., Hickey R. (1998) The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS, *Cartography*, 27:1, 9-15, DOI: [10.1080/00690805.1998.9714086](https://doi.org/10.1080/00690805.1998.9714086)
- English, L. (1999). *Improving data warehouse and business information quality*. New York: Wiley.
- EU (2007). Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information [Official Journal L 171, 29.6.2007]
- EU (2017). Commission Regulation (EU) 2017/1347 of 13 July 2017 correcting Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EU) No 582/2011 and Commission Regulation (EU) 2017/1151 supplementing Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EC) No 692/2008 and Commission Regulation (EU) No 1230/2012 and repealing Regulation (EC) No 692/2008
- Fairfield, J., Leymarie, P. (1991). Drainage networks from grid digital elevation models', *Water Resources Research*, 27:709-717
- FGDC (1998). FGDC-STD-007.3-1998. The National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA). Federal Geographic Data Committee.
- Fisher, P.F. and N.J. Tate (2006). Causes and Consequences of Error in Digital Elevation Models. *Progress in Physical Geography*, 30, 467-489.
- Fleming, M. D., and R. M. Hoffer. 1979. Machine processing of Landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping. LARS Technical Report 062879. Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA
- Freeman, G.T. (1991). Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid, *Computers and Geosciences*, 17:413-22
- Guth, P.L., 1995, Slope and aspect calculations on gridded digital elevation models: Examples from a geomorphometric toolbox for personal computers: *Zeitschrift fur Geomorphologie N.F. Supplementband 101*:31-52.
- Hickey R. (2000) Slope Angle and Slope Length Solutions for GIS, *Cartography*, 29:1, 1-8, DOI: [10.1080/00690805.2000.9714334](https://doi.org/10.1080/00690805.2000.9714334)
- Horn, B. K. P. 1981. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE* 69(1): 14-47.
- Hutchinson MF. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology* 106: 211- 232.
- Hutchinson, M. F., J. L. Stein, J. C. Gallant, and T. I. Dowling 2013. "New Methods for Incorporating and Analyzing Drainage Structure in Digital Elevation Models." In *Proceedings of the 3rd International Conference on Geomorphometry*. Nanjing, China. Available at <http://geomorphometry.org/Hutchinson2013>
- ICSM (2008). *ICSM Guidelines for Digital Elevation Data v.1*. Intergovernmental Committee on Surveying and Mapping (ICSM). <http://www.icsm.gov.au/elevation/ICSM-GuidelinesDigitalElevationDataV1.pdf>

- Illari P. (2014) IQ: Purpose and Dimensions. In: Floridi L., Illari P. (eds) *The Philosophy of Information Quality*. Synthese Library (Studies in Epistemology, Logic, Methodology, and Philosophy of Science), vol 358. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07121-3_14
- Indecon (2014). Assessment of the Economic Value of the Geospatial Information Industry in Ireland. <https://osi.ie/wp-content/uploads/2016/02/Economic-Value-of-the-Geospatial-Information.pdf> [19/11/2021]
- ISO (2013). ISO 19157:2013 Geographic information — Data quality
- ISO (2015). ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements
- ISO (2016). ISO 8000-61:2016. Data quality — Part 61: Data quality management: Process reference model.
- ISO (2020). ISO 8000-2:2020 Data quality — Part 2: Vocabulary
- ISO, IEC (2008). ISO/IEC 25012:2008 Software engineering — Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Data quality model
- Jankowfsky S., Branger F., Braud I, Gironas J, Rodriguez F (2013). Comparison of catchment and network delineation approaches in complex suburban environments. Application to the Chau-danne catchment, France. *Hydrological Processes*, Wiley, 27(25), p. 3747 - p. 3761. 10.1002/hyp.9506.
- Jenson, S. K, and J O. Dominique. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation model data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 54 (11): 1593-600.
- Kevin H. Jones, (1998). A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM, *Computers & Geosciences*, Volume 24, Issue 4, Pages 315-323, ISSN 0098-3004, [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(98\)00032-6](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(98)00032-6).
- Lee, Y. W., Strong, D. M., Kahn, B. K., & Wang, R. Y. (2002). AIMQ: A methodology for information quality assessment. *Information & Management*, 40(2), 133-146. doi: 10.1016/S0378-7206(02)00043-5.
- Lemmens, M.J.P.M. (1999). Uncertainty in automatically sampled digital elevation models. In Lowell, K., Jaton A. (Ed). *Spatial accuracy assessment: Land information uncertainty in natural resources*. Sleeping bear Press, Inc. pp. 339-407.
- Martz, L. W., and J. Garbrecht. 1998. "The Treatment of Flat Areas and Depressions in Automated Drainage Analysis of Raster Digital Elevation Models." *Hydrological Processes* 12: 843-855. doi:10.1002/(ISSN)1099-1085
- Mathur, P. 1989. Calculation of slope angles from DEM. *Cartography Specialty Group Student Papers*. pp. 15-27.
- Matthew E. Baker, Donald E. Weller, and Thomas E. Jordan (2006) Comparison of Automated Watershed Delineations: Effects on Land Cover Areas, Percentages, and Relationships to Nutrient Discharge PE&RS
- Maydanchik, A. (2012). *Data Quality Assessment*. Data quality for practitioners' series. Technics Publications, LLC
- McGilvray, D. (2008). *Executing Data Quality Projects*. Ten Steps to Quality data and trusted Information. Morgan Kaufmann.
- Mesa-Mingorance JL., Ariza-López FJ (2020). Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (DEMs): A Critical Review of Practices of the Past Three Decades *Remote Sensing* 12, no. 16: 2630. <https://doi.org/10.3390/rs12162630>
- Mesa-Mingorance, J.L.; Chicaiza-Mora, E.G.; Buenaño, X.; Cai, J.; Rodríguez-Pascual, A.F.; Ariza-López, F.J. Analysis of Users and Uses of DEMs in Spain. *Int. J. Geo-Inf.* 2017, 6, 406
- Michael E. Hodgson (1998) Comparison of Angles from Surface Slope/Aspect Algorithms, *Cartography and Geographic Information Systems*, 25:3, 173-185, DOI: 10.1559/152304098782383106
- O'Callaghan, J.F., Mark, D.M. (1984). 'The extraction of drainage networks from digital elevation data', *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28:323-344
- Olson, J. (2003). *Data Quality: The Accuracy Dimension*. Morgan Kaufmann Publishers.
- OS (2013). OS TERRAIN 5 User guide and technical specification. Ordnance Suevey, UK.
- Oxera (2013). What is the economic impact of Geo services? https://www.oxera.com/wp-content/uploads/2018/03/What-is-the-economic-impact-of-Geo-services_1-1.pdf [19/11/2021]
- Planchon, O., and F. Darboux. 2002. "A Fast, Simple and Versatile Algorithm to Fill the Depressions of Digital Elevation Models." *Catena* 46: 159-176. doi:10.1016/S0341-8162(01)00164-3.
- Podobnikar T. (2009). Methods for visual quality assessment of a digital terrain model. *SAPIENS*. 2(2):1-10. <https://sapiens.revues.org/738> [accessed 26 October 2017].
- Redman, T.C. (2013). Data Quality Management Past, Present and Future. En Sadiq, S. (Ed.) *Handbook of Data Quality*. Research and Practice. Springer.
- Reinoso-Gordo, J.F. (2020). Casos de uso. En proyecto: "Calidad funcional de modelos digitales de elevaciones del terreno en ingeniería", Programa Estatal, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, Convocatoria 2019.
- Romero-Zalaz R., Reinoso-Gordo J. (2018) An Updated Review on Watershed Algorithms. In: Cruz Corona C. (eds) *Soft Computing for Sustainability Science*. Studies in Fuzziness and Soft Computing, vol 358. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62359-7_12
- Seibert, J., McGlynn, B. (2007). 'A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models', *Water Resources Research*, Vol. 43, W04501
- Sharpnack, D. A, and G. Akin. 1969. An algorithm for computing slope and aspect from elevations. *Photogrammetric Engineering* 35(3): 247-8.
- Spatineo, GIS-kvalitet i Norden (2019). The economic benefits of geodata in digital urban planning and building process in Sweden. [19/11/2021]
- Tang J., & P. Pilesjö (2011). Estimating slope from raster data: a test of eight different algorithms in flat, undulating and steep terrain. In *River Basin management VI* 143. doi: 10.2495/RM110131
- Tang J., Pilesjö P. (2011). Estimating slope from raster data: a test of

- eight different algorithms in flat, undulating and steep terrain. En River basin management.
- Tarboton, D.G. (1997). 'A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models', Water Resources Research, Vol.33, No.2, p.309-319
- Tarquini, S., and L. Nannipieri (2017). The 10 m-resolution TINITALY DEM as a trans-disciplinary basis for the analysis of the Italian territory: Current trends and new perspectives. Geomorphology 281:108-115.
- The Economist (2017). The world's most valuable resource is no longer oil, but data. <https://www.economist.com/leaders/2017/05/06/the-worlds-most-valuable-resource-is-no-longer-oil-but-data>
- Vasseur, B., Jeansoulin, R., Devillers, R., Frank, A. (2006). External quality evaluation of geographical applications: an ontological approach. En Devillers, R. y Jeansoulin, R. (Ed). Fundamental of Spatial Data quality. GIS Series ISTE.
- Veregin, H. (1999). Data quality parameters. En P.A. Goodchild MF Maguire DJ Rhind DW (Ed) Geographical Information Systems Longley, NY, John Wiley & Sons.
- Wechsler, S.P. Perceptions of Digital Elevation Model Uncertainty by DEM Users. URISA J. 2003, 15, 57-64.

Sobre los autores

Francisco Javier Ariza López

Desde 1994 ha impartido asignaturas relacionadas con la topografía, la producción cartográfica, la reproducción de mapas, los sistemas de información geográfica, las infraestructuras de datos espaciales, el desarrollo de aplicaciones SIG e IoT, etc. Sus líneas de investigación abarcan la calidad de datos y procesos, la generalización cartográfica y las aplicaciones de los SIG y la teledetección al medio ambiente. Es autor de más de cien artículos, de cuatro libros en la temática de la calidad de datos geoespaciales, de varias normas y guías sobre calidad de datos. Ha dirigido más de cien trabajos tutelados de alumnos y trece tesis doctorales centradas en el ámbito geoespacial. Ha dirigido varios proyectos de investigación del Plan Nacional, así como numerosos proyectos con empresas y administraciones nacionales e internacionales en el campo de la geomática.

Juan Francisco Reinoso Gordo

Doctor en Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría, actualmente es Profesor Titular de Universidad en el Departamento de Expresión Gráfica, Arquitectónica y en la Ingeniería de la Universidad de Granada, impartiendo clase en las titulaciones de Grado en Ingeniería Civil y Grado en estudios de Arquitectura. Previamente trabajó en empresa constructora, en el Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire y fue profesor en la Universidad de Jaén. Ha realizado estancias internacionales en las Universidades de California, Davis (EEUU) y Federale do Paraná (Brasil). Ha sido investigador principal en varios proyectos de investigación relacionados con la calidad BIM y con la calidad funcional de modelos digitales de elevaciones. También ha investigado sobre la documentación digital del Patrimonio mediante técnicas fotogramétricas y escáner láser. Es miembro del Grupo de

Investigación Ingeniería Cartográfica (TEP164) y del laboratorio Survey and Modelling Lab (SMLAB).

José Luis García Balboa

Ingeniero Técnico en Topografía (1997), Ingeniero en Geodesia y Cartografía (1998) y Doctor por la Universidad de Jaén (2006). Profesor del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría de la Universidad de Jaén desde 1999, ha impartido asignaturas relacionadas con la topografía, la producción cartográfica, las infraestructuras de datos espaciales y la teledetección en diversos títulos de grado, máster y doctorado. Ha sido coordinador del Máster propio en Evaluación y Gestión de la Calidad de la Información Geográfica. Miembro del Grupo de Investigación Ingeniería Cartográfica (TEP164), sus áreas de investigación se centran en la calidad de la información geográfica, la generalización cartográfica y la incertidumbre de medida en la instrumentación topográfica, siendo autor de diversas publicaciones internacionales con índice de impacto. Colabora con entidades de normalización, participando activamente en la elaboración y traducción de normas y guías sobre calidad de datos.

Antonio F. Rodríguez Pascual

Antonio F. Rodríguez Pascual (Madrid, 1959), licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid, ingresó como Ingeniero Geógrafo en el IGN en el año 1986 por oposición y en el Cuerpo Superior de Sistemas y Tecnologías de la Información en 1993 por concurso. Ha sido subdirector del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), secretario y presidente del UNE/CTN 148 «Información geográfica digital» y Profesor Asociado en la UPM durante 16 años. Tiene experiencia en Cartografía Asistida por Ordenador, MDT, Bases de Datos, SIG, Modelado, Calidad, Metadatos, Normalización, IDE, servicios web y datos abiertos.

Instituto Geográfico Nacional

O. A. Centro Nacional de Información Geográfica

Tu mundo,
nuestra referencia



www.ign.es



@IGNSpain



@IGNSpain



IGNSpain



IGNSpain



IGNSpain

Mapas e imágenes en tu dispositivo móvil

Instituto Geográfico Nacional

O. A. Centro Nacional de Información Geográfica

General Ibáñez de Ibero 3. Madrid, 28003

91 597 95 14, fax: 91 597 97 73

consulta@cnig.es

www.ign.es



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

INSTITUTO
GEOGRÁFICO
NACIONAL



Vigilancia y seguimiento de la erupción en Cumbre Vieja La Palma (España)

REVISTA **MAPPING**
Vol. 31, 207, 16-29
Año 2022
ISSN: 1131-9100

Eruption surveillance and monitoring at Cumbre Vieja, La Palma (Spain)

Carmen López Moreno

Resumen

Este artículo es una transcripción, editada y resumida, de la charla divulgativa impartida por Carmen López, Directora del Observatorio Geofísico Nacional Instituto Geográfico Nacional (IGN) en el Ateneo de Valencia el 7 de abril de 2022, cuatro meses después del final de la erupción. En él, se relata la experiencia de colaboración, llevada a cabo por un amplio número de expertos pertenecientes a una larga lista de entidades, durante la vigilancia y el seguimiento de la erupción de Cumbre Vieja, en la isla de La Palma, en 2021. También se repasan brevemente las técnicas aplicadas para anticipar el fenómeno eruptivo que se utilizaron en esta ocasión. La experiencia ha sido por un lado terrible, dados los enormes daños sufridos en las cosechas, viviendas e infraestructuras y el profundo daño económico y social producido. Pero, por otro lado, ha sido una experiencia muy positiva en cuanto a coordinación y colaboración de organismos y organizaciones de todos los niveles, en lo relativo a la respuesta de la población y ha constituido una vivencia humana de la que todos hemos aprendido.

Abstract

This article is an edited and summarized transcription of the informative talk given by Carmen López, Director of the National Geophysical Observatory National Geographic Institute (IGN) at the Ateneo de Valencia on April 7, 2022, four months after the end of the eruption. It contains a description of the collaborative experience, carried out by a large number of experts belonging to a long list of entities, during the surveillance and monitoring of the eruption of Cumbre Vieja, on the island of La Palma, in 2021. The techniques applied to anticipate the eruptive phenomenon used on this occasion are also briefly reviewed. On the one hand, the experience has been terrible, given the enormous damage suffered in crops, housing and infrastructure and the deep economic and social damage produced. But, on the other hand, it has been a very positive experience in terms of coordination and collaboration of agencies and organizations at all levels, in terms of the response of the population and it has been a human experience from which we have all learned a lot of things.

Palabras clave: Erupción, Volcán, Cumbre Vieja, La Palma, Observatorio Geofísico Nacional.

Keywords: Eruption, Volcano, Cumbre Vieja, La Palma, National Geophysical Observatory.

Carmen López Moreno
Observatorio Geofísico Nacional IGN
clmoreno@mitma.es

Recepción 20/05/2022
Aprobación 16/06/2022

TRANSCRIPCIÓN, EDITADA Y RESUMIDA, DE LA CHARLA DIVULGATIVA IMPARTIDA EN EL ATENEO DE VALENCIA EL 7 DE ABRIL DE 2022, CUATRO MESES DESPUÉS DEL FINAL DE LA ERUPCIÓN

Primeramente, nos centraremos en saber dónde está la Palma. La isla de la Palma es una de las ocho islas del archipiélago canario. Está a unos cuantos miles de kilómetros hacia el sur, enfrente de la costa africana y es uno de los archipiélagos con actividad volcánica que hay en esa zona del Atlántico, porque también ha habido y hay volcanes activos en las islas de Cabo Verde y en las islas Azores. Se trata de una zona cercana a bordes de placa. La tectónica de las placas africana, norteamericana y euroasiática, más la existencia de lo que se llama una pluma mantélica, que es material caliente que atraviesa la Tierra, viene de las profundidades, se sitúa debajo de las Canarias y tiene una anomalía térmica, es lo que define el escenario que produce erupciones como la reciente de Cumbre Vieja. Esa pluma provee de magma a los procesos eruptivos del archipiélago.

Las islas Canarias se han levantado a partir del suelo oceánico, que se encuentra a unos 4 km de profundidad al oeste del archipiélago. Se han construido unas islas maravillosas a base de erupciones. Son islas volcánicas activas, que han tardado unos 60-80 millones de años en

formarse. Por lo tanto, la existencia de cada una de las islas que componen el archipiélago canario se debe a una serie de fenómenos eruptivos, como lo atestiguan las erupciones más recientes. Precisamente en la isla de la Palma es donde más erupciones ha habido en los últimos 500 años, concretamente seis anteriores a esta de 2021, que se han situado todas en la zona llamada Cumbre Vieja, en la mitad sur de la isla. La parte norte está ocupada por la caldera de Taburiente, una estructura muy alta, muy rígida y muy antigua que ya no es volcánicamente activa. Toda la actividad se concentra actualmente en la mitad que va desde el centro de la isla hacia el sur.

También ha habido, en lo que llamamos época histórica, en los últimos 500 años, cuatro erupciones en Tenerife, dos en Lanzarote y una en la isla de El Hierro. La anterior erupción que ocurrió en las Canarias, tuvo lugar en la isla del Hierro, en 2011, y fue una erupción submarina, que duró cuatro meses. Por otro lado, la erupción más larga tuvo lugar en Lanzarote entre 1730 y 1736.

Si consideramos las siete erupciones, incluida la actual, que han tenido lugar en La Palma, en Cumbre Vieja, puede verse que todas las coladas van hacia el mar (véase la figura 1) porque parten de la zona más elevada. La zona está llena de edificios volcánicos. Es la zona más alta de la isla por todo el material volcánico que se ha ido acumulando y, con el paso del tiempo, la isla ha ido ganando altura debido a ese motivo. Incluso, ha habido alguna erupción que ha tenido coladas tanto hacia la vertiente este como hacia la oeste.

La última erupción anterior a la que nos ocupa es la del volcán Teneguía, situado al sur de la isla, en 1971, una erupción se podría decir menor, comparada con la que se ha vivido recientemente en La Palma. Se formó un edificio

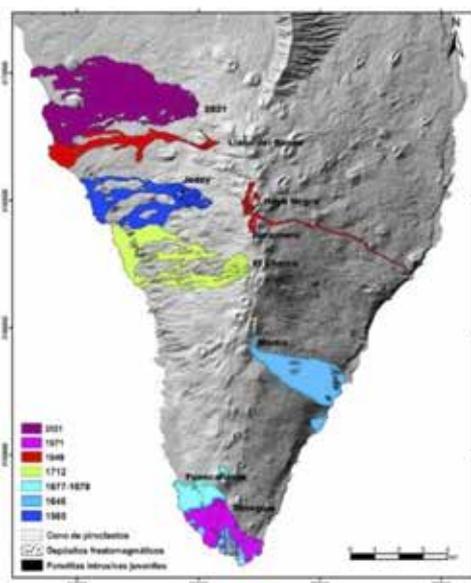


Figura 1. Erupciones históricas en la isla de La Palma. Fuente IGN

Año	Erupción	Precur. días	Inicio	Fin	Días	Años reposo	Área km ²	Comp.
1585	Jedey/Tajuya	~50	19-may	10-ago	84	93-155?	3.8	BN, P, T
1646	Tigalate/Martin	1	1-oct	21-dic	82	61	4.4	BN
1677-78	Fuencaliente	4	17-nov	21-ene	66	31	4.5	BN
1712	El Charco	5	9-oct	3-dic	56	35	3.8	BN, T
1949	Duraznero		24-jun	30-jul				BN, T
	Llano del Banco	884	8-jul	26-jul	37	237	3.7	BN, T
	Hoyo Negro		12-jul	30-jul				BN, PT
1971	Teneguía	6	26-oct	18-nov	24	22	2.6	BN, T
2021	???????	1440	19-sep	13-dic	85	50	12.19	BN, T

volcánico, de menor tamaño que el de Cumbre Vieja, y hubo coladas de lava que fueron hasta el mar por una zona en la que no había población alguna y casi no hubo daños materiales. Por el contrario, en la erupción que hemos vivido recientemente en la isla de La Palma, los centros eruptivos han cubierto 12 kilómetros cuadrados de territorio en el valle más rico desde el punto de vista económico y más poblado de la isla, que es el valle de Los Llanos de Aridane. El evento ha provocado daños en tres municipios, Tazacorte, El Paso y Los Llanos de Aridane, y realmente el impacto ha sido enorme, con grandes pérdidas y con peligros que todavía perduran.

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) tiene desde 2004 la responsabilidad de la vigilancia volcánica en el archipiélago. Debemos saber cuándo, cómo y dónde va a haber una erupción. Para ello, es necesario conocer el estado del volcán a través del conocimiento detallado de la geología del lugar, hace falta desplegar redes de observación (luego veremos en qué consisten) y hay que hacer modelos para poder anticiparnos a la ocurrencia de la erupción y proporcionar a Protección Civil las alertas correspondientes y los escenarios oportunos. Es una tarea de predicción similar de alguna manera a la que realiza en meteorología la AEMET. Podemos en cierta medida anticiparnos al impacto de la erupción, de manera que Protección Civil tenga los datos a tiempo para tomar las medidas de mitigación necesarias, como por ejemplo evacuar a la población.

La geología es la herramienta que nos proporciona el conocimiento de cómo funciona el interior de los volcanes. En el subsuelo de la isla de La Palma se encuentra la corteza, una capa terrestre rígida de unos 30 km de profundidad en zonas continentales, que en islas oceánicas es menor, de unos 12-15km, por debajo de la cual tenemos materiales más dúctiles, en los que aparecen anomalías térmicas y, en el caso de Canarias, contiene un material que viene desde zonas profundas, que se va acumulando y es lo que llamamos magma, roca incandescente, cuya presión va aumentando a medida que se acumula por debajo de la corteza. Cuando esa presión es mayor que la resistencia de la corteza, el magma empieza a atravesarla y, por último, asciende para crear y alimentar una erupción.

Todo ese proceso es realmente violento y genera una serie de señales muy claras, terremotos, deformación y salida de gases volcánicos, que nosotros con nuestras redes de vigilancia podemos empezar a registrar días, semanas e incluso meses antes de que comience la erupción. De manera que, si tenemos una red de vigilancia adecuada y estamos atentos, podemos avisar a Protección Civil con antelación y anticiparnos al inicio del evento, incluso proporcionando escenarios temporales,

previéndolo si estamos muy cerca o no de la erupción, y escenarios espaciales que indiquen cuál es el área en la que es más probable que se inicie la erupción. Porque cuando el magma se acumula bajo la superficie, lo primero que hace la sobrepresión es deformar elásticamente la corteza. Luego supera el límite de resistencia del terreno, lo fractura y genera terremotos, detectables con estaciones sísmicas dotadas de un sensor que registra la vibración y que nosotros instalamos en sondeos a más de 15-20 metros de profundidad. Asimismo, la presión deforma la superficie y la Tierra se hincha como cuando se mete un pastel en el horno, con una geometría muy determinada que señala cuál es el centro de presión y a qué profundidad se encuentra.

Hay técnicas, por ejemplo, la interferometría InSAR (Interferometría Radar de Apertura Sintética), que permiten describir con precisión cómo se está deformando la superficie terrestre mediante satélites que observan esa superficie en cada pasada. Hay otras técnicas geodésicas, como la red GNSS (*Global Navigation Satellite System*), que no es más que un GPS (*Global Positioning System*) similar al que llevamos en el móvil, pero de mucha más precisión, que nos proporcionan el tiempo y las coordenadas del terreno que se deforma con mayor precisión y con resoluciones que pueden llegar a ser subcentimétricas. La red GNSS, junto a los datos inSAR, la red de altimetría, los datos de los inclinómetros y la información de las campañas RTK de toma de datos que realiza el IGN, permiten vigilar con gran precisión la deformación de la superficie de la isla de La Palma de manera prácticamente continua y en tiempo real. Por otro lado, el magma tiene grandes cantidades de gas a presión dentro de su matriz. Cuando el magma se aproxima a la superficie, el gas se libera debido a la disminución de presión, empieza a desplazarse hacia la superficie por difusión y también a disolverse en los cuerpos de agua cercanos y, si se toman muestras de agua, se puede detectar cómo han variado los gases disueltos en ella.

Todas estas técnicas permiten anticipar la llegada del magma a la superficie. Además de las redes de observación mencionadas, disponemos de expertos en la aplicación de métodos numéricos y la simulación de escenarios para conocer en qué zona va a ser más probable que se encuentre el centro eruptivo, cómo serían los posibles escenarios para cada peligro volcánico. Por ejemplo, por dónde van a discurrir las coladas de lava o en qué dirección se va a desarrollar la columna eruptiva asociada a las emisiones volcánicas, etcétera. Por lo tanto, disponiendo de información sobre la geología de la zona, los datos de observación que se registran en redes de vigilancia y los métodos numéricos de simulación, y teniendo además el mejor personal experto, que es el que se tiene en el IGN,

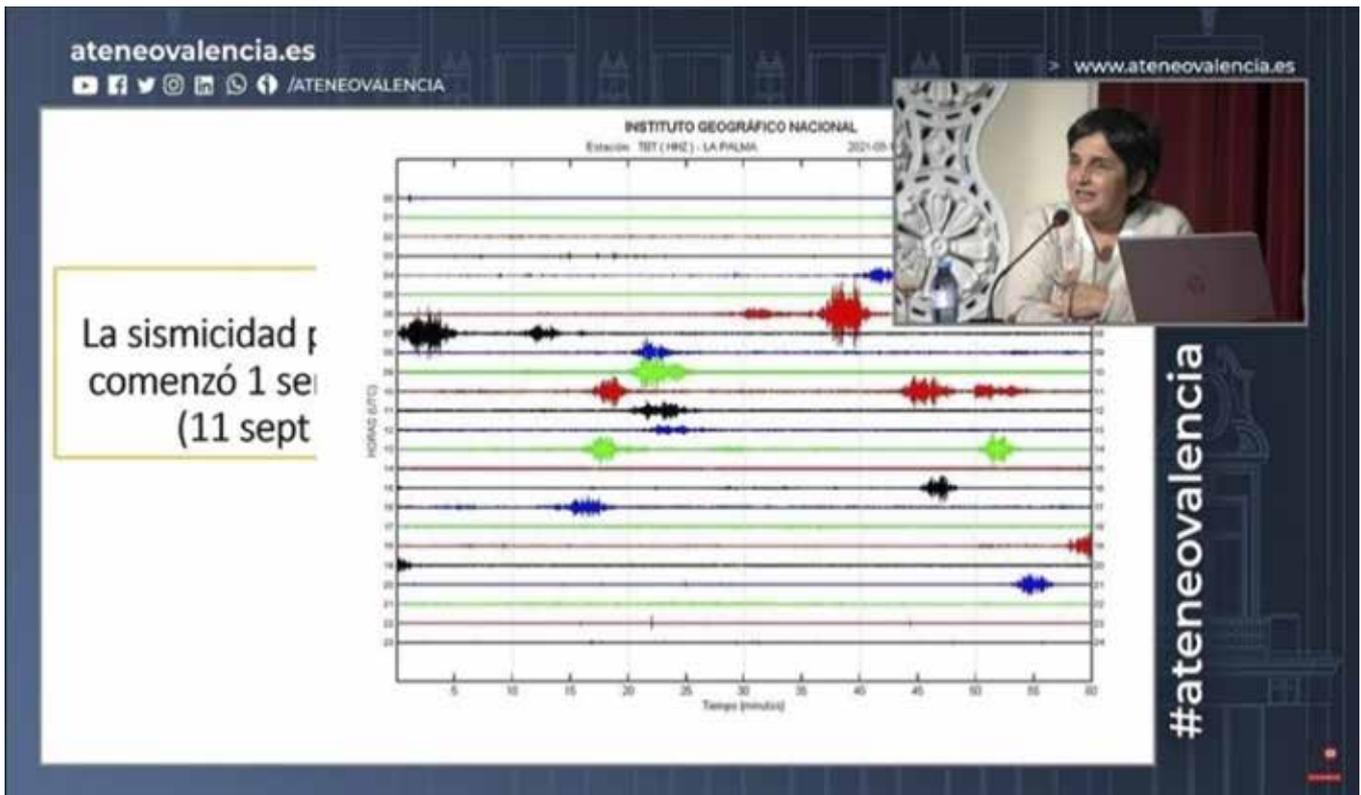


Figura 2. Registro sísmico de Cumbre Vieja del 11 de septiembre de 2017

es posible anticipar en gran medida todos los aspectos de un fenómeno volcánico.

En el Instituto Geográfico Nacional disponemos de un equipo humano formado por unas 50 personas, distribuidas en dos centros, trabajando en turnos que cubren las 24 horas los siete días de la semana. Tenemos muchísima instrumentación que está registrando datos en tiempo real y que permite vigilar continuamente cómo evoluciona la actividad volcánica en todas las islas. Hemos acumulado además una gran experiencia por haber participado en la gestión de las erupciones de la isla del Hierro y de la isla de La Palma y hemos visto hasta qué punto los fenómenos asociados al volcanismo deben ser abordados con un enfoque multidisciplinar porque, además de lo dicho, esa intrusión magmática modifica el campo gravitatorio cuando se acerca a la superficie, altera el campo magnético terrestre, produce anomalías térmicas, fractura, deforma y hace vibrar a la superficie, y en consecuencia tenemos instalados estaciones geoquímicas, gravímetros, magnetómetros, sismómetros e inclinómetros en la zona, y también utilizamos técnicas como el inSAR y GNSS.

Además, puesto que se liberan gases específicos, medimos su concentración, ya sea que se encuentren disueltos en agua o difusos, en forma de emisiones en la superficie hacia la atmósfera. También aparecen variaciones de temperatura, y las registramos a través de

instrumentación de termometría y cámaras especiales con la precisión suficiente. Todos esos datos, captados en tiempo real en el sistema de vigilancia volcánica implementado, han permitido realizar el seguimiento completo de la erupción de La Palma desde los primeros signos tempranos de actividad anómala.

La erupción en sí, ocurre en 2021, pero cuatro años antes ya empezó a aparecer cierta actividad anómala. En octubre de 2017 se registró un enjambre de sismos en tierra, cuando la sismicidad de la isla es prácticamente nula. Entre 2017 y 2021 se produjeron siete series de ese tipo, localizadas en la misma zona. Su profundidad estaba entre los 20 y los 25 km, eran sismos muy pequeños y la población no los sintió, pero hubo una alerta de Protección Civil, se reunieron los comités de expertos y se interpretó lo ocurrido en términos de una posible intrusión magmática por debajo de la isla, en la zona de Cumbre Vieja, con un volumen tan pequeño que no había llegado aún a producir deformaciones en la superficie. También aparecieron los gases típicos en estos casos, que son los isótopos del helio, y hubo una serie de aumentos de la concentración de hidrógeno, un gas asociado a la existencia de magma fresco. Eran evidencias débiles, pero que no se habían dado desde la última erupción, producida 50 años antes, en 1971. En realidad, se puede decir que cuatro años antes de la erupción, el volcán nos estaba indicando que estaba ocurriendo algo, que se estaba

acumulando magma por debajo de Cumbre Vieja.

Esto es lo que pasó el día 11 de septiembre de 2017 (véase la figura 2). En ella podemos ver lo que llamamos un registro sísmico, lo que registra un sismómetro, que mide la vibración del suelo. Cada línea representa la actividad durante una hora, desde las 00 hasta las 01, desde las 01 hasta las 02 y así sucesivamente. Las estaciones están alejadas de lo que es ruido cultural, por eso el registro es plano en ausencia de actividad. Las perturbaciones más pequeñas están causadas por coches que pasan cerca de la estación. Un coche produce una vibración, que nosotros no detectamos si estamos situados a 100 metros, por ejemplo, pero un sismómetro, sí. Es lo que se denomina actividad cultural o antrópica, y se nota que está concentrada en las horas diurnas, mientras que por la tarde empieza a aparecer otro tipo de actividad, debida a terremotos muy pequeños, que pueden durar a lo mejor 10-20 segundos, con una amplitud muy pequeña. En principio, se pensó que se podría tratar de otro enjambre más, pero rápidamente se vio que la profundidad era de solo 12 km, frente a los 20 o 25 km de los anteriores. Eso, que no había ocurrido nunca hasta entonces, indicaba que la fracturación que creaba la sobrepresión del material estaba ya cerca de la superficie, lo que nos alertó inmediatamente.

Se lo comunicamos a Protección Civil y al cabo de dos días comenzaría ya a reunirse el comité científico del plan de emergencias PEVOLCA (Plan de Emergencias Volcánicas de Canarias), que no dejó de reunirse ya, al menos una vez al día, hasta dos meses después de finalizar la erupción y que todavía se reúne cada dos semanas.

Vale la pena examinar qué ocurrió el día siguiente, el 12 de septiembre (véase la figura 3). Después de una mañana de relativa tranquilidad, los terremotos comenzaron a ser más frecuentes y de mayor magnitud, hasta que por la tarde alguno llegó a ser sentido por la población y, en menos de una semana, empezó la erupción.

La erupción fue un proceso muy acelerado y de gran



Figura 3. Registro sísmico de Cumbre Vieja del 12 de septiembre de 2017. Fuente IGN.

energía. La profundidad de los seísmos era cada vez menor y su migración espacial describía día a día la migración del magma desde los 12 kilómetros hasta la superficie. En tan solo algo más de una semana antes de la erupción (8 días), se produjeron 9000 eventos que empezaron en la vertical de Cumbre Vieja, luego migraron hacia el NE y posteriormente, hacia la superficie, pues la profundidad de los terremotos fue disminuyendo progresivamente, desde los 10-12 km desde el día 11 hasta el día 15 de septiembre, hasta los 0-2 km desde esta fecha hasta el día 19 de septiembre, día en el que comenzó una señal continua, llamada tremor volcánico. Esta es la señal que se registra en los sismómetros cuando hay una vibración asociada a un fluido en una geometría determinada, que, en nuestro caso, corresponde al magma fluyendo por el dique y significaba que ya había empezado la erupción. El tremor volcánico es una señal que acompaña a toda la erupción durante su duración, algo similar a la vibración que se nota en las cañerías antes de que empiece a salir agua cuando ha estado cortado el suministro y se abren los grifos al máximo. En este caso duró hasta el 13 de diciembre. Dos días más tarde de comenzar la sismicidad, desde el día 12, se registran claramente deformaciones en la red geodésica, mostrando una deformación del terreno inferida de los datos GPS, compatible con la evolución de la sismicidad. La superficie del terreno cercana a la erupción se elevó hasta 30 cm. Esos datos, junto a los de los inclinómetros y los desplazamientos de estaciones GNSS, nos permitió situar el centro de presión muy cerca de donde iban a surgir los centros eruptivos.

Aplicando métodos matemáticos, se puede modelizar el proceso y saber cuál es el volumen de magma en kilómetros cúbicos que hay que situar debajo de la superficie para producir esa deformación. La máxima deformación fue de 30 cm y apareció muy cerca de la zona en la que se iniciaría la erupción. Y esa información la teníamos con días de antelación.

Otra técnica muy útil es la que ya hemos mencionado como tecnología InSAR, en la que un satélite emite una radiación electromagnética que rebota sobre la superficie y vuelve al satélite. El patrón de interferencia de la onda emitida y de la reflejada permite determinar la topografía con gran precisión. Cuando se realizan sucesivas pasadas, nos permite tener la diferencia en la forma del terreno que se produce por su deformación entre una pasada del satélite y la siguiente, lo que permite determinar las máximas deformaciones. La zona de estos máximos marca muy claramente también el área del futuro centro eruptivo.

Todas estas técnicas se aplican dentro del



Figura 4. Inicio de la erupción en varias bocas a lo largo de una fisura

mencionado Plan PEVOLCA del Gobierno de Canarias, en el que hemos colaborado más de 800 personas durante la emergencia y han participado una larga lista de instituciones científicas: el IGN, el CSIC, la AEMET, INVOLCAN, el IGME, las Universidades Canarias, Calidad del Aire del Gobierno de Canarias, etc. y en el Comité Director estaban Gobierno de Canarias, los cabildos, los ayuntamientos, Protección Civil, Cruz Roja y los Cuerpos y Fuerza de Seguridad del Estado, entre otros. Todas las organizaciones participantes han destacado recursos humanos e infraestructuras sobre el terreno y los han mantenido allí durante toda la crisis. Nosotros hemos participado en el Comité Científico y el clima de colaboración era extraordinario, se compartía toda la información y se facilitaban todos los datos de interpretación y pronóstico al Comité Director para que tomase las decisiones oportunas que permitieran tomar las medidas de mitigación más efectivas.

Se ha hecho todo lo posible para mitigar los daños, aunque no ha sido posible mitigarlos al cien por cien, como es fácil de comprender a la vista de la extensa superficie de coladas emitidas durante esta erupción y la pérdida dolorosa e irremediable de viviendas, cultivos e infraestructuras que conllevan. Hay que estar aliviados porque no ha habido víctimas y porque se han tomado las medidas preventivas adecuadas, sobre todo evacuaciones, con celeridad y eficacia. Cuando se inició la

erupción, la zona estaba totalmente evacuada de manera preventiva desde bastantes horas antes. El inicio de la erupción ha podido ser grabado, pues había cámaras de la televisión canaria en la zona, pues ya sabíamos aproximadamente dónde se iba a producir con antelación. Fue muy impresionante porque la erupción se inicia cerca de Cabeza de Vaca, en la Hoya de las Flores, en zona de pinar y, horas antes nos reportan que no había ni un solo animal, ni un pájaro ni un insecto y toda el área estaba en silencio. Algo rarísimo. Tan solo se oían ruidos subterráneos y se sentía una vibración vertical a causa de la sismicidad.

La erupción empezó en una fisura, que es como suelen comenzar las erupciones monogenéticas en las islas Canarias. Se puede decir que el magma sube por un plano (el dique) y corta la superficie en diferentes puntos, cada punto aparece un centro de emisión, de manera que al comienzo se contaron hasta nueve puntos que emitían material incandescente, alguno creando ya una pequeña columna de ceniza y otros ya generando ya coladas de lava que discurrían a favor de la pendiente. Surgió en una zona de pinar, a unos pocos cientos de metros de las primeras viviendas. En la figura 4 puede verse el inicio de la erupción, con material incandescente y emisión de gases y ceniza. Esta emisión será continua desde el 19 de septiembre hasta el 13 de diciembre. Como es sabido, el daño a las viviendas, a las infraestructuras, a

la ganadería y a la agricultura ha sido muy considerable. Las coladas llegaron a cortar tres carreteras principales, las conducciones eléctricas y las conducciones de agua de la vertiente oeste. Y las pérdidas, irreparables, no solamente en lo material sino, y es la parte más dolorosa, en lo inmaterial, se han perdido todos los recuerdos y todo un estilo de vida en gran parte del Valle de Aridane.

El IGN abrió un Centro de Atención y Vigilancia en el municipio de Tajuya en El Paso, gracias a la generosidad de su Ayuntamiento y a la Iglesia de El Paso que nos cedieron un amplio local al efecto. Allí trabajábamos desde las siete de la mañana hasta las once de la noche, allí vivimos casi de continuo y todavía nos desplazamos a él como centro de operaciones para ver cómo evoluciona la situación una vez finalizada la erupción. Una de las cosas que más impresiona es cómo ruge el volcán, cosa que hace con diferentes ritmos e intensidad. Cuando la lava se fragmenta a su salida del centro emisor, en el cráter, se crea una emisión de piroclastos que luego va cayendo con diferente tamaño, a veces de milímetros o centímetros, formando la ceniza o lapilli y otras de gran tamaño, en forma de bombas volcánicas. El volcán además emitía flujos de lava y emisiones de tipo hawaiano, con lava muy fluida que creaba lagos interiores que rebasaban periódicamente. La emisión más explosiva, de tipo estromboliano, alimentaban columnas incandescentes de hasta 600 metros de altura. La explosividad era importante, de manera que toda esta actividad fue construyendo un edificio volcánico con gran celeridad.

El segundo día de erupción ya se podía observar un edificio principal, encajado en una hoya en pendiente, la Hoya de las Flores. La erupción rápidamente rellenó la hoya y comenzó a generar un edificio con varias bocas, que se mantuvieron activas. Ha habido ocasiones en las que había distintas columnas, unas blancas, de vapor de agua, y otras oscuras, de ceniza. La erupción ha sido enormemente dinámica con una parte explosiva y otra efusiva, es decir, con actividad estromboliana y hawaiana al mismo tiempo. La emisión de ceniza era muy abundante,



Figura 5. Flujos de lava. Fuente: Abián San Gil

te, ceniza que llevaba el viento y caía en las poblaciones de los tres municipios colindantes, en Tazacorte, en Los llanos, en El Paso, llegaba hasta el aeropuerto de La Palma, luego cambiaba la dirección del viento y caía sobre la otra vertiente. Llenaba las conducciones, los desagües, todos los embalsamientos de agua para regadío, caía también sobre los cultivos de las plataneras, causando gran daño por su elevada temperatura y por su carácter ácido.

Las coladas han sido también el peligro que ha causado más daño. Se trata de material que sale muy caliente, a 1200 grados de temperatura, en su flujo a favor de la pendiente va generando unas zonas un enfriamiento lateral, y se va enfriando a medida que avanza, de manera que a veces la superficie queda fría y la lava fluye por debajo y forma un tubo volcánico. En ocasiones, la lava transporta grandes bloques de lava o del propio edificio volcánico, lo que resulta muy impresionante. Hay un gran número de vídeos disponibles en la página web del Instituto Geológico y Minero de España (IGME)¹. El IGME activó su Unidad de Drones y sobrevoló la zona permitiendo el registro en el espectro térmico y en el visible. También volaron el gobierno de Canarias y el IGN. Hubo días que se realizaron hasta 40 vuelos, por lo que hay una gran cantidad de información. Esta erupción ha sido una de las más documentadas del mundo, desde luego la mejor documentada en Canarias, por lo que se puede seguir paso a paso su evolución y dinámica.

En la figura 6 puede verse un jameo, que es una oquedad producida por el hundimiento del techo de un tubo de lava volcánico, en el que por debajo está corriendo la lava. Se ha visto cómo crecían, se construían y se destruían, en ocasiones en poco tiempo, partes completas del edificio volcánico. A veces se generaban deslizamientos de parte de un sector del edificio y, muy frecuentemente, había desbordes de lava que incluso presentaban morfologías escalonadas de lavas y material incandescente que rebasaban y ensanchaban el frente del recubrimiento de las zonas ya previamente afectadas.

Las coladas han causado un gran daño en las poblaciones. La lava muy fluida, muy caliente, avanzaba bastante rápido, a decenas de metros por segundo cerca de su emisión; luego se iba enfriando y avanzaba de manera más lenta, a velocidades de unos pocos metros por hora, pero progresaba de manera inexorable. El frente era imponente, con la altura de un edificio de tres o cuatro plantas, al arremeter contra las edificaciones ejercía una presión de arrastre enorme y las destruía completamente, además de producir su combustión. En ocasiones, la

¹<https://info.igme.es/eventos/Erupcion-volcanica-la-palma/videos>



Figura 6. Jameo producido en la erupción del volcán Cumbre Vieja

lava dejaba isletas entre coladas. La población ha estado contantemente preocupada y vigilando día a día la evolución del proceso, intentando saber con los vídeos disponibles si su vivienda había sido o no afectada. Desgraciadamente, después de los 83 días de actividad, la mayoría de esas isletas se han ido cubriendo poco a poco, lo que ha sido una verdadera agonía para los habitantes del valle.

Al final, las coladas han llegado hasta el mar siguiendo un recorrido que se ha podido prever mediante simulaciones que han servido a Protección Civil para definir las zonas de exclusión, evacuando a la población gradualmente a medida que los peligros se acercaban. Pues una vez que se conocía la distribución de máxima probabilidad de las coladas de lava, era necesario anticiparse y sacar a la población, antes o después, dependiendo de la velocidad de la lava, de la zona que podía quedar cubierta por una colada. De hecho, con el paso de los días, el 13 de diciembre quedó cubierta prácticamente toda el área marcada como extensión potencial de las coladas en el mapa de escenarios que confeccionó el IGN. La lava cubrió casi todo, excepto algunas zonas de mayor altura, incluso llegó al mar para formar las llamadas fajas, plataformas costeras de origen volcánico que son en realidad deltas lávicos, con los que la erupción le ha ganado terreno al mar.

Durante la erupción también se registró una importante sismicidad que se localizó tanto entre los 30 y 40 kilómetros de profundidad como entre los 10 y 20 kilómetros, también en la zona central de Cumbre Vieja. Algunos de esos temblores se llegaron a sentir en otras islas, como Tenerife, La Gomera y El Hierro. Se trata de la

sismicidad asociada al proceso de realimentación de la erupción desde los reservorios más profundos. Algunos días se llegaron a sentir hasta 45 terremotos con intensidades importantes. También se produjo más deformación, con episodios de inflación-deflación del terreno relacionados también con la dinámica de realimentación de la erupción. Los últimos días de la erupción fueron de gran intensidad, con una actividad explosiva muy importante, desde nuevos puntos de emisión. La intensa actividad alimentó una columna de 8,5 km de altura. También fue explosiva la actividad cuando la lava llegó al mar sufriendo un proceso de enfriamiento brusco, se produjo actividad de fragmentación y emisión de piroclastos a cientos de metros, con el consiguiente peligro. A la vez se liberaban nuevas emisiones de gases, que pueden ser tóxicas por la mezcla de la lava y los gases con el agua de mar, lo que obligó a evacuar temporalmente nuevas zonas costeras. Todo el proceso fue muy dinámico y la situación cambiaba día a día.

Como ya hemos dicho, hubo un verdadero problema causado por la columna eruptiva, constituida por gases y ceniza a muy alta temperatura, y material de mayor tamaño que era arrojado en vertical de manera muy explosiva. Esa columna eruptiva llegó a ser imponente y de gran altura. El material arrojado se emite con mucha energía cinética y térmica, por lo que se eleva a gran altura hasta que se estabiliza. Así pues, la altura a la que puede llegar la parte superior de la columna es proporcional al nivel de explosividad de la erupción. Esta columna es dispersada y guiada por acción de los vientos predominantes, que permiten que la ceniza, de menor tamaño, recorra grandes distancias por lo que llega a afectar a las pobla-

ciones más cercanas. Las localidades de Los Llanos, Tazacorte, El Paso y Las Manchas se vieron afectadas por el penacho volcánico y la caída de ceniza. El viento, cuando era intenso y soplabla en dirección a estas poblaciones, dirigía el penacho sobre ellas favoreciendo la acumulación de ceniza sobre las calles y los tejados, por lo que había que realizar labores de limpieza. Además empeoraba la calidad del aire por partículas en suspensión. Estas situaciones se dieron con muchaintensidad, lo que obligó a tomar medidas preventivas y recomendar el uso de mascarillas FFP2, no realizar actividades al aire libre y el cierre de colegios. Había partículas muy pequeñas en suspensión, que en altas concentraciones son peligrosas para la salud.

En la figura 7, puede verse en una zona norte de la isla, desde la caldera de Taburiente, cómo se está midiendo y calibrando con métodos topográficos la altura de la columna eruptiva. Este dato ha sido muy importante para la regulación del tráfico aéreo. Se media diariamente, por la mañana temprano y también cada vez que sufría un cambio notable de altura la columna, y era reportado al VAAC de Toulouse (Francia), entidad que regula el tráfico aéreo europeo, para evitar encuentros no deseados de los aviones con material volcánico. De tener un encuentro, la ceniza se funde y se pega a los rotores, pudiendo paralizar los motores. El aeropuerto de La Palma estuvo cerrado por ese motivo en muchas ocasiones.

También aparecieron gases volcánicos perjudiciales para la salud, como es el dióxido de azufre, que el viento transportó casi hasta el continente africano como reflejan los satélites de observación terrestre de la ESA del Programa Copernicus. En las Cañadas del Teide se midieron niveles de este compuesto que no se habían detectado hasta entonces. El día 13 de diciembre, horas antes de finalizar la erupción, la columna alcanzó su máxima altura, cercana a los 9 km sobre el nivel del mar. La ceniza, al dispersarse debido a la acción de los vientos,

no solamente afectó a las áreas cercanas a la erupción, sino también a toda la actividad de la isla. Nos obligaba a realizar muchas tareas de mantenimiento *in situ* pues cubría los paneles solares de toda nuestra instrumentación y nos causaba innumerables problemas en las estaciones de medida. Como la instrumentación de vigilancia volcánica tiene que estar lejos de las poblaciones que son fuente de ruido, los equipos se alimentan mediante baterías y paneles solares, pero éstos últimos se cubrían de ceniza constantemente, y necesitaban limpiezas diarias. Además, la ceniza empeoraba las conexiones frecuentemente.

Además de las tareas de mantenimiento de las estaciones, se realizaban tareas cerca del volcán, tanto de inspección como de recogida de muestras de lava y de gases volcánicos. Estos datos han sido de suma importancia para vigilar la dinámica eruptiva y las características de la lava emitida, pues su estudio permite detectar cambios en los magmas que alimentan la erupción y pueden inferirse signos de agotamiento del proceso. También analizábamos la composición de los gases disueltos en las aguas de la zona y de los gases emitidos, en busca de estas señales de evolución de la erupción. Asimismo, utilizábamos cámaras térmicas que nos permitían registrar la actividad de manera objetiva y continua de la columna eruptiva e instalamos estaciones multigás, tanto al norte como al sur de Cumbre Vieja. En suma, mantuvimos un amplio abanico de actividades mediante al menos tres equipos humanos del IGN destacados *in situ* en la isla, con tres coches, más las personas que atendían los centros de procesamiento y análisis en las sedes del IGN, más el personal que asistían a las reuniones de los comités del PEVOLCA y daban las ruedas de prensa (M^a José Blanco, Directora del IGN en Canarias, y yo misma), más las personas que atendían a la prensa tanto desde La Palma como desde Tenerife y Madrid. Un gran equipo de vigilancia volcánica, que ha realizado una labor excepcional.



Figura 7 Medición de la altura de la columna eruptiva. Fuente IGN.





Figura 8. Avance de la lava. Fuente IGN

Las últimas coladas importantes fueron las que fluyeron hacia el sur, parcialmente a través de tubos volcánicos. Una de las imágenes más impresionantes son las que se ven surgir en el porche de una casa. Fueron coladas efímeras que se fue enfriando con rapidez. La mayoría de estas coladas laterales han sido muestreadas. Con la ayuda de las EPI adecuadas, se recogían fragmentos que tenían que ser enfriados antes de manipularlos. La situación cercana al campo de lavas al sur es muy impresionante, con casas cubiertas por más de cuatro metros de ceniza. A pesar de ello, los principales problemas de salud pública, como ya hemos mencionado, fueron causados por los gases volcánicos y las partículas en suspensión.

Esta erupción ha supuesto un riesgo potencial no solo para las infraestructuras, sino también para la población. En su gestión, se ha desplegado un puesto de mando avanzado en el que estaba Protección Civil del Gobierno de Canarias, trabajando y movilizándolo todos los recursos nacionales y autonómicos. Por ejemplo, coordinaba la realización de la medida de gases en las poblaciones afectadas y el acceso a las distintas zonas de exclusión, entre muchas de las tareas. Gobierno de Canarias con su Protección Civil y todas las fuerzas y cuerpos de seguridad autonómicas y estatales, ha llevado a cabo una labor admirable, manejaban datos en tiempo real y respondían de manera continua con las medidas adecuadas a la evolución del proceso, anticipándose a los peligros de una manera ejemplarmente organizada.

En los últimos días de la erupción, igual que comenzó la señal de tremor volcánico, que indica que hay un fluido que está llegando y alimentando la erupción, de pronto, el día 13 de diciembre disminuyó, se estabilizó en un nivel muy bajo y de pronto, entre las 20 y las 22 horas

por fin y tras unas semanas en las que disminuyeron todos los parámetros de observación, la erupción terminó después de 85 días de actividad. Los daños originados fueron inmensos, se habían cubierto más de 12 kilómetros cuadrados con coladas de lava, había más de 2000 personas afectadas, más de 7000 evacuados, más de 74 kilómetros lineales de carretera perdidos y una gran cantidad de cultivos arruinados. En la zona de Los Llanos de Aridane se da la variedad de plátano de más calidad de todas las islas Canarias. Había tres municipios afectados y los efectos de la erupción eran impresionantes por el tamaño de las superficies y volúmenes afectados.

Sin embargo, la erupción está calificada en términos volcanológicos como pequeña. En una escala del VEI (Índice de Explosividad Volcánica) desde 0 hasta 8, tiene un VEI de 3. Pero es una erupción que ha ocurrido en un entorno urbano, que ha durado 85 días y al haber llegado las coladas a varias poblaciones ha causado daños que han sido muy cuantiosos. El edificio volcánico que ha formado es alargado, está situado en pendiente, con una altura máxima de unos 200 metros y una longitud de unos 600 metros; hay zonas con coladas de 60 ó 70 metros de espesor, el espesor mínimo es de 10 metros, cerca de la costa, y ha habido gran número de centros de emisión que han estado emitiendo gases, ceniza y material incandescente.

En parte ha sido emocionante para nosotros vivir la experiencia de observar una erupción tan de cerca y con una profusión de datos tan espectacular, pero lo más impresionante ha sido ver cómo colaboraban equipos humanos tan amplios, de instituciones y organizaciones tan diversas, durante tantos días y con una entrega y una coordinación ejemplares. Todos hemos aportado

lo mejor de nosotros mismos, hemos intentado estar a la altura de las circunstancias y en conjunto, todo lo vivido ha constituido una de esas experiencias que se te quedan grabadas en la memoria y te cambian tanto en lo personal como en lo profesional. Lo más admirables ha sido el comportamiento de la población de la isla de La Palma, han estado ejemplares, mostrando una resiliencia y una generosidad sin igual. Creo que llevan en sus genes grabada la naturaleza de lo que supone una erupción, como el pino canario, que ya está rebrotando incluso dentro del entorno del cono volcánico, y la verdad es que, en los momentos de trabajo más

duro, los que lo habían perdido todo nos alentaban casi más a nosotros que lo que nosotros podíamos alentarlos a ellos.

Hemos tenido muchísimo trabajo de observación, atención a medios y ha sido una erupción muy seguida por la opinión pública, y también con muchísimo apoyo de autoridades públicas, que han estado acompañándonos a lo largo de numerosas visitas. Las ayudas oficiales han empezado a llegar incluso antes de que acabase la erupción, sin embargo, el proceso de reconstrucción va a ser más largo y va a ser más difícil de lo que imaginamos.

En la figura 10 puede verse el volcán, el edificio volcánico que ha quedado, un edificio volcánico que se está desgasificando y enfriando lentamente. Está emitiendo todavía gases tóxicos que son irrespirables, y que obliga a permanecer en la zona con mascarillas protectoras. Actualmente lo estamos explorando con cámaras térmicas



Figura 9. Trabajos de campo. Fuente Iván Torres

y en zonas de fractura, se puede comprobar que la temperatura interna se mantiene todavía entre 900 y 1000 grados. El edificio está en proceso de transformación lenta, con pequeños deslizamientos y asentamiento. Hay amplias zonas con depósitos de azufre y carbonatos y se va viendo cómo poco a poco se transforma.

Hoy en día sigue habiendo sismicidad, aunque haya terminado la erupción, lo que indica que hay un fenómeno residual de tendencia hacia el equilibrio en el interior del sistema. No podemos descartar que incluso pueda haber algún episodio de repunte de la sismicidad, con algún terremoto que todavía sea sentido por la población o un enjambre de sismos. Así paso en El Hierro, en donde la erupción finalizó en 2012 y durante tres años, hasta de 2014 hubo enjambres de sismicidad, incluso sismos importantes, con algunos días en los que se registraron hasta 400 terremotos. Actualmente, en Cumbre Vieja hay de 10 a 20 temblores al día.

Estamos estudiando la estabilidad del cono volcánico y cómo se enfría. Hay un problema y es que hay emisión de dióxido de carbono, que es un gas muy pesado que no es tóxico si no alcanza niveles altos de concentración, pero que en niveles altos puede llegar a desplazar al oxígeno. En dos poblaciones costeras, La Bombilla y Puerto Naos, hay niveles tan altos que saturan nuestros aparatos de medida. Estas zonas siguen, por lo tanto, evacuadas.

En la página web del Instituto Geográfico Nacional (www.ign.es) hay mucho material gráfico, vídeos y profusión de datos, que han estado en todo momento a disposición de la población, porque pensamos que proporcionar



Figura 10 Edificio volcánico de Cumbre Vieja al terminar la erupción
Fuente IGN

información genera confianza y permite al gran público seguir el fenómeno de manera fiable. En cada reunión del Comité Científico se hacía una valoración de los datos disponibles y se llegaba a un comunicado diario diseñado por consenso entre todos los científicos. De esa manera la información era única y esta información ha sido la base para los comunicados a la población. Controlar el flujo de información en una situación así, para que sea veraz, detallada, bien explicada y consensuada es muy importante porque en las redes sociales hay un gran número de volcanólogos, unos acreditados y otros aficionados, que pueden sin querer contribuir a la difusión de bulos e informaciones alarmistas o a la creación de una situación confusa con datos e interpretaciones divergentes. Esto es especialmente relevante porque es muy humano prestar más atención a una fuente cercana de información y no a la más acreditada y fiable. La verdad es que, a pesar de que desde el primer momento se han oído detalles disparatados, como que la isla se iba a partir o se estaba hundiendo, el mensaje oficial ha llegado con mucha claridad a la población y ha generado confianza en la gestión de la emergencia.

En el caso de la erupción de Cumbre Vieja ha habido un equipo de grandes profesionales que han estado trabajando en la comunicación y se ha creado un clima de confianza como pocas veces se ha visto en situaciones parecidas, lo que unido a la inteligente y acertada gestión del Gobierno de Canarias y del Gobierno de España, y la

excelente labor de todas las instituciones científicas participantes, ha permitido que la situación se afrontase con mucha calma y responsabilidad. Hemos aprendido mucho de los profesionales de la comunicación en cuanto a cómo divulgar y cómo exponer detalles científicos especializados para que fueran entendibles por la población en general y a hablar en situaciones de tiempo real, porque a veces tienes a tu disposición un micrófono, explicas algo rápidamente y luego te arrepientes y te das cuenta de cómo podrías haberlo hecho mejor. Un científico no es en principio un gran comunicador y hay mucho que aprender en ese sentido en una situación de emergencia.

A pesar de la tragedia que hay detrás de todos los datos que se han recogido, estos datos contienen información muy valiosa. Ha sido uno de los procesos eruptivos monitorizados de manera más completa y detallada, lo que permitirá avanzar en muchos campos y especialmente en el pronóstico de erupciones. En ese sentido, hay patrones en los datos de medida muy relevantes, que se pueden conocer, identificar y luego utilizar para realizar previsiones más ajustadas. Por ejemplo, hay estadísticas muy interesantes sobre procesos de *unrest*. De todos los procesos de intrusión magmática que producen actividad de tipo preeruptiva, los que terminan con una erupción constituyen un porcentaje menor, pues en la mayoría de las ocasiones, el proceso aborta, la actividad se detiene y no culmina en erupción. El magma no alcanza la presión suficiente y finalmente se queda estancado cerca de la su-



Figura 11. Llegada de una colada a una población



perficie. Eso se ve con más claridad *a posteriori*, claro.

Sin embargo, a corto plazo (estamos hablando de horas o días) sí que se pueden identificar señales que indican, con probabilidad creciente a medida que aparecen, que va a producirse una erupción. Estas señales que permiten realizar pronósticos se observaron desde el día 15 al 19, cuando se detectó una aceleración en el incremento de la sismicidad, con más terremotos, siempre de mayor tamaño, también se constató una migración de sismicidad hacia la superficie, una aceleración en la aparición de deformaciones del terreno y temblores de magnitud máxima nunca anteriormente registrados. Para el día 19, todos esos signos era indicativos de que podían quedar poco tiempo para una erupción, sin poder estimarse con precisión la ventana temporal. Aunque no se podía descartar que el proceso abortase, era probable que pudiera haber una erupción a corto plazo y por ello se efectuaron las simulaciones de recubrimiento de coladas.

En cuanto a la posibilidad de detener una colada, la verdad es que poco puede hacerse frente a un frente de lava que puede tener 10 metros de altura, que ejerce tal presión que es capaz de descalzar casas y mover los cimientos. Eso es imparables, se intentó hacer algo, pero fue imposible. Lo que sí se ha conseguido en Islandia es desviar, que no detener, una colada en su fase final utilizando agua marina

del puerto, cuando el avance era ya más débil. Estas coladas tenían una viscosidad, un tamaño y una temperatura que las hacían imparables, evaporaban el agua de piscinas y depósitos de manera casi instantánea, rellenaban grandes huecos... era un avance impresionante.

Ha sido una gran experiencia desde todos los puntos de vista y creo que, en conjunto, todas las partes implicadas pueden sentirse muy satisfechas. Muchas gracias por su atención.

Sobre la autora

Carme López Moreno

Geofísica, vulcanóloga e investigadora española, Directora del Observatorio Geofísico Nacional IGN y fue una de las vigilantes de la erupción del Volcán de Cumbre Vieja en Las Palmas.1 El 13 de marzo de 2022 el Instituto Geográfico Nacional fue condecorado con la Medalla al Mérito de la Protección Civil, por la labor desarrollada en la crisis volcánica de La Palma y López fue la encargada de recoger la medalla en nombre de la Dirección General.

Nuevo catálogo macrosísmico de terremotos perceptibles en Cuba 2017 – 2020

REVISTA **MAPPING**
Vol. 31, 207, 30-41
Año 2022
ISSN: 1131-9100

New macroseismic catalog of perceptible earthquakes in Cuba 2017 – 2020

Antonio Salgado Castillo, Raúl Palau Clares

Resumen

Una herramienta de vital importancia con la que deben contar los servicios sismológicos es un catálogo macrosísmico, pues este permite la reinterpretación constante de la propagación de las ondas sísmicas en la región de estudio y facilita los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo. Consecuentemente, el presente trabajo tuvo como objetivo, aportar un nuevo catálogo macrosísmico de terremotos perceptibles en Cuba 2017 – 2020, a partir de mapas teóricos estimados de intensidades sísmicas. Es así, que se incluyeron los 12 eventos perceptibles con $M_w \geq 4.3$ ocurridos en Cuba. Se realizó una comparación de la efectividad entre los estimados teóricos y la información macrosísmica real de dos eventos (17/01/2017 y 28/01/2020), obteniendo similitud en más del 86%. Los resultados evidenciaron la factibilidad de Incluir el software Intensity_Map en la rutina diaria del Servicio Sismológico Nacional Cubano, y generar los mapas de intensidades ante la ocurrencia de un sismo. Asimismo, el nuevo catálogo, permite visualizar los valores teóricos estimados de intensidades, lo que facilita la toma de decisiones a las autoridades pertinentes y permite realizar valoraciones sobre la atenuación sísmica en términos de intensidad.

Abstract

A vitally important tool that seismological services must have is a macroseismic catalogue, since it allows constant reinterpretation the propagation of the seismic waves in the study region and facilitates hazard, vulnerability and risk studies. Consequently, the present work aimed to provide a new macroseismic catalog of perceptible earthquakes in Cuba 2017 - 2020, based on estimated theoretical maps of seismic intensities. Thus, the 12 perceptible events with $M_w \geq 4.3$ that occurred in Cuba were included. A comparison of the effectiveness between the theoretical estimates and the real macroseismic information of two events (01/17/2017 and 01/28/2020) was made, obtaining similarity in more than 86%. The results evidenced the feasibility of including the Intensity_Map software in the daily routine of the Cuban National Seismological Service, and generating intensity maps in the event of an earthquake. Likewise, the new catalog allows the visualization of the estimated theoretical values of intensities, which facilitates decision-making for the pertinent authorities and allows assessments to be made on the seismic attenuation in terms of intensity.

Palabras clave: Catálogo macrosísmico, estimación cartográfica, intensidad sísmica, isosistas, terremotos.

Keywords: Macroseismic catalog, cartographic estimation, seismic intensities, isoseismal, earthquakes.

Antonio Salgado Castillo
Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Cuba
asalgadocastillo@gmail.com

Recepción 05/04/2022
Aprobación 23/05/2022

1. INTRODUCCIÓN

La intensidad sísmica es un parámetro que permite estimar la severidad del movimiento del terreno en función de los efectos estructurales, teniendo presente que estos dependen de la condición y antigüedad de las construcciones, de la calidad de los suelos y de la topografía (Chuy, 1999). También es necesario observar los efectos del terremoto sobre el terreno y el subsuelo, así como los peligros asociados inducidos por el sismo, tales como desplazamiento de fallas, de tierra, maremotos, lahares e inundaciones (CERESIS, 2004).

Con el decursar de los años, las diferentes escalas elaboradas para estimar la intensidad sísmica se han modificado poco a poco, a fin de reflejar mejor la severidad del movimiento sísmico de la tierra. Es así que, a pesar, de no ser una escala basada en mediciones instrumentales, la «intensidad sísmica» satisface un aspecto que ningún otro parámetro instrumental mide de manera certera, es decir, la cuantificación de los daños causados por un terremoto dónde y cuándo ocurre (Palau *et al.*, 2019).

Ahora bien, desde el punto de vista conceptual, la intensidad se denota como I , y que en un punto dado se produce por la ocurrencia de un sismo de magnitud M , dependiendo de la distancia que separa el foco del punto en cuestión y de la forma en que se comporta la atenuación de la intensidad sísmica en una región (Chuy, 1999).

La ventaja de la intensidad sísmica es que permite rescatar del pasado, basándose en crónicas y otros escritos, suficientes criterios como para aventurar un estimado de la intensidad y «cuantificar» el terremoto de acuerdo con la escala de Intensidades de su preferencia (Palau *et al.*, 2019). Consecuentemente, con el objetivo de disminuir el riesgo y responder eficientemente ante la ocurrencia de un terremoto, mayormente cuando los datos de las redes de acelerómetros son limitados, se hace uso de la intensidad sísmica (Pérez, 2014).

Es así, que, para modelar dicha intensidad, se han empleado diferentes modelos, destacando isosistas circulares, las cuales responden a una atenuación uniforme de la intensidad (Sandoval *et al.*, 2012; Porras, 2017; Palau *et al.*, 2019). Sin embargo, las isosistas reales de los terremotos mayormente no son circulares, y su forma depende, en primera instancia, de las estructuras geológicas presentes en la región donde el terremoto haya ocurrido (Ghosh y Mahajan, 2013; Schmidt, 2014).

Una precisión importante, es que cuando se modela o se realiza el cálculo de atenuación por intensidades teóricas, no se tienen en cuenta los posibles efectos de sitio, ni los efectos topográficos. De ahí, que gane mayor importancia la macrosísmica apoyada en los trabajos de campo con su correspondiente estimación teórica *a priori*.

Por otra parte, en el análisis de los terremotos perceptibles, la caracterización del tiempo de aparición y ubicación espacial de premonitores y réplicas, está condicionada a las características geodinámicas de la región donde esté ubicada la zona activa que los originó (Arango *et al.*, 2017). En este contexto hay que señalar, que Cuba por su posición geográfica está expuesta a un alto peligro sísmico, debido a su proximidad a la zona de contacto entre la placa de Norteamérica y el Caribe, conocida como falla Oriente (Cotilla, Córdoba y Álvarez, 2021).

Ahora bien, una herramienta de vital importancia con la que deben contar los servicios sismológicos es un catálogo macrosísmico, pues este permite la interpretación y reinterpretación constante de la propagación de las ondas sísmicas en la región de estudio y facilita los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgo; denominados comúnmente (PVR) (Salcedo, Blandón y Ríos, 2021).

Cuando se menciona catalogo macrosísmico, por lo general se alude a la descripción o datos que cuentan con el mayor valor de intensidad para cada sismo. Sin embargo, no se incluyen los mapas de intensidades que, en la práctica, es lo que realmente aporta información y facilita la toma de decisiones.

1.1. Antecedentes y situación problemática

La intensidad de un evento sísmico es un valor que depende de los efectos en las personas, en objetos o en la naturaleza, así como de los daños que pueda ocasionar en general a los inmuebles, por lo que tiene cierto grado de subjetividad.

Las escalas de intensidad sísmica categorizan la intensidad o severidad del temblor del suelo en un lugar determinado, como el resultado de un terremoto. Se distinguen de las escalas de magnitud sísmica, que miden la magnitud o la fuerza general de un terremoto, que puede, o quizás no, causar un temblor perceptible. La intensidad máxima observada y la extensión del área donde se sintió el temblor, pueden usarse para estimar la ubicación y magnitud del terremoto; esto es especialmente útil para terremotos históricos donde no hay registro instrumental (Salgado *et al.*, 2021).

En este orden de ideas se debe precisar, que, en Cuba para la determinación de la intensidad, primero se usaba la escala MSK (Medvedev, 1968) y actualmente se usa la escala EMS-98 de (Grünthal, 1998) teniendo en cuenta que la tipología constructiva de la misma se acerca más a la realidad de las construcciones cubanas (ONN, 2017).

Ahora bien, la intensidad del temblor depende de varios factores además de la magnitud del terremoto (Bolt, 1982), uno de los más importantes son las condiciones del suelo. Por ejemplo, las capas gruesas de suelo blando (como el relleno) pueden amplificar las ondas sísmicas, a

menudo a una distancia considerable de la fuente, mientras que las cuencas sedimentarias a menudo resuenan, lo que aumenta la duración del temblor.

En sismología, se utiliza un mapa para mostrar líneas de intensidad sísmica igualmente percibidas (isosistas). También contienen información sobre las condiciones del suelo en ubicaciones particulares, la geología subyacente, el patrón de radiación de las ondas sísmicas, posibles efectos de sitio y la respuesta de diferentes tipos de edificios. La forma y el tamaño de las regiones de isosistas se pueden utilizar para ayudar a estimar la magnitud, profundidad, y mecanismo focal de un sismo (Linkimer, 2008).

En el caso de la magnitud de un terremoto, se puede estimar aproximadamente midiendo el área afectada por el nivel de intensidad 3 o superior en km² y tomando el logaritmo (Linkimer, 2008). Una estimación más precisa se basa en el desarrollo de funciones de calibración regionales derivadas utilizando muchos radios isoseismales. (Ambraseys y Douglas, 2004). Estos enfoques permiten estimar magnitudes para terremotos históricos y relocalizarlos.

En el caso de los mecanismos focales, estos se calculan de forma rutinaria utilizando datos telesísmicos, pero persiste una ambigüedad ya que siempre son posibles dos planos de falla potenciales. La forma de las áreas de mayor intensidad generalmente se alarga a lo largo de la dirección del plano de falla activo y es aquí donde las isosistas pueden ayudar a seleccionar el plano correcto (Linkimer, 2008).

Debido a la historia relativamente larga de observaciones de intensidad macrosísmica (que a veces se remonta a varios siglos en algunas regiones), los mapas de isosistas pueden usarse para probar evaluaciones de peligros sísmicos comparando la frecuencia temporal esperada de diferentes niveles de intensidad, asumiendo que una evaluación es verdadera y la tasa observada de superación (Pecker *et al.*, 2017).

Consecuentemente, la obtención de un mapa de intensidades ante un sismo cobra relevancia, más aún si se consideran las ventajas que brindan actualmente los sistemas para la sismología en tiempo real (STR) (Pérez, 2014). En este sentido, se han realizado varios trabajos, destacándose la plataforma para el manejo de catálogos de intensidades sísmicas vía web (CERESIS, 2004), la propuesta de Sandoval *et al.* (2012) GENMAPS para la generación de mapas de intensidades sísmicas en tiempo real, el Shakemap (Worden *et al.*, 2016) y el Intensity_Map (Palau *et al.*, 2019).

No obstante, lo anterior, en Cuba se siguen estimando las intensidades de forma manual. Actualmente, aunque se ha instalado una red acelerográfica en la provincia de

Santiago de Cuba, la más expuesta a sismos, no se ha logrado implementar el Shakemap debido a varios factores tecnológicos, organizativos y económicos.

Motivo por el cual, en el año 2019 se diseñó e implementó una herramienta computacional denominada Intensity_Map, que permite estimar teóricamente las intensidades de los sismos. Esta herramienta se probó y validó con varios sismos para la región suroriental de Cuba y sus resultados fueron publicados en la Revista Mapping, quedando como principales recomendaciones su generalización a otras regiones del país y con un mayor número de eventos (Palau *et al.*, 2019).

Es así, que, al realizar una revisión de los mapas de intensidades sísmicas existentes en Cuba, se pudo concluir que solo contaban para algunos eventos realizados de forma manual basado en revisiones históricas, y dos recientes, en los años 2017 y 2020 respectivamente, a los cuales se les realizaron análisis macrosísmicos con la información del terreno, pero muy escueta, pues se utilizaron muy pocos puntos de información (CENAI, 2017, 2020).

Lo analizado, implica necesariamente contar con herramientas computacionales que de manera automática y en un tiempo *cuasi* real brinden resultados efectivos referidos a magnitud, parámetros hipocentrales, intensidad y posibles áreas dañadas por el sismo, lo que permitiría agilizar y concentrar los recursos.

Consecuentemente, el presente trabajo tuvo como **objetivo** aportar un nuevo catálogo macrosísmico de terremotos perceptibles en Cuba 2017 – 2020, a partir de mapas teóricos estimados de intensidades sísmicas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada en esta investigación se sustentó en tres etapas: la primera consistió en la selección de la región de trabajo y los eventos que se utilizarían; en la segunda, se aplicó el *software* Intensity_Map usando los datos de los estudios seleccionados y en la tercera se realizó una comparación entre los resultados teóricos y reales de los mapas de intensidades para dos eventos recientes.

2.1. Área de estudio y conjunto de datos

La región de estudio estuvo delimitada por: Lat. **N 18.4-23.2** y Lon. **O 73-83.3**, incluyendo así a Cuba y áreas cercanas. Se seleccionaron 12 sismos con sus respectivas coordenadas epicentrales (Latitud: Lat, Longitud: Lon), profundidad (Prof.) y magnitud (Mw), los cuales corresponden al período instrumental (ver Tabla 1).

La selección de estos sismos responde a que fueron los más representativos en cuanto a magnitud y perceptibilidad, también se tuvo en cuenta que en la escala ma-

crossísmica vigente en Cuba (EMS-98), los daños de grado 1 en algunos pocos edificios de clase de vulnerabilidad A y B pueden aparecer a partir del grado de intensidad 5 (Grünthal, 1998, p.18), que se corresponde a eventos de $M_w \geq 4.3$ de acuerdo a las estimaciones teóricas que se obtienen con la herramienta Intensity_Map (Palau *et al.*, 2019).

lo que se corresponde con los datos de la sismicidad histórica del país.

Por otra parte, los eventos fueron representados de acuerdo a los valores de magnitud y profundidad. Estos dos parámetros son muy importantes para el cálculo del campo macrosísmico y en ellos influye directamente la calidad de la detección de los sismos, específicamente los

Tabla 1. Terremotos perceptibles en Cuba con magnitud de momento $M_w \geq 4.3$. Fuente: (CENAI, 2021).

Eventos (Fecha)	Lat. Norte	Lon. Oeste	Prof. Km	Mw.	Eventos (Fecha)	Lat. Norte	Lon. Oeste	Prof. Km	Mw.
1/17/2017	19.690	-76.670	10	5.8	1/28/2020	19.340	-78.790	20	7.7
7/30/2017	23.230	-81.190	10	4.5	4/29/2020	20.170	-74.142	5	4.6
11/9/2017	19.577	-77.982	26	4.3	5/17/2020	19.717	-76.455	6.5	4.6
10/6/2018	20.069	-73.025	15	5.9	5/17/2020	19.738	-76.465	5	4.3
10/7/2018	20.028	-72.998	5	5.2	5/18/2020	19.699	-76.453	3.4	4.4

Sin embargo, estos eventos apenas cuentan con información macrosísmica determinada en el terreno, de ahí la importancia del nuevo catálogo que se presenta utilizando mapas de intensidades teóricas.

Otro aspecto, que se tuvo en cuenta fue la utilización de la M_w para todos los eventos, pues esta escala de magnitud ha probado ser más robusta ya que está relacionada con parámetros físicos de la fuente como el desplazamiento de la falla y la longitud de ruptura (Villalón y Palau, 2018).

La figura 1, muestra la distribución geográfica de los 12 eventos perceptibles durante el período de estudio. Como se puede apreciar, la mayoría se localizan en la parte oriental y sólo uno en la parte noroccidental de Cuba,

parámetros hipocentrales del foco. Los que se garantizan con alta precisión al contar con modelos de velocidades propios para la región (Moreno, Grandison, Atakan, 2002; Palau, Moreno y Blanco, 2006), un umbral de detección efectiva de la red sismológica (cualquier sismo de una $M_w \geq 3$ puede ser registrado por al menos tres estaciones) (Palau *et al.*, 2018) y la determinación de la magnitud por momento (M_w) como rutina para todos los eventos, lo que facilita el trabajo con el catálogo cubano en cuanto a estudios de peligrosidad sísmica (Villalón y Palau, 2018).

Ahora bien, si se consideran fijos los valores de magnitud, se cumple que a mayor profundidad mayor será el área de alcance de las isosistas, asimismo si se fija una profundidad determinada, a mayor valor de magnitud

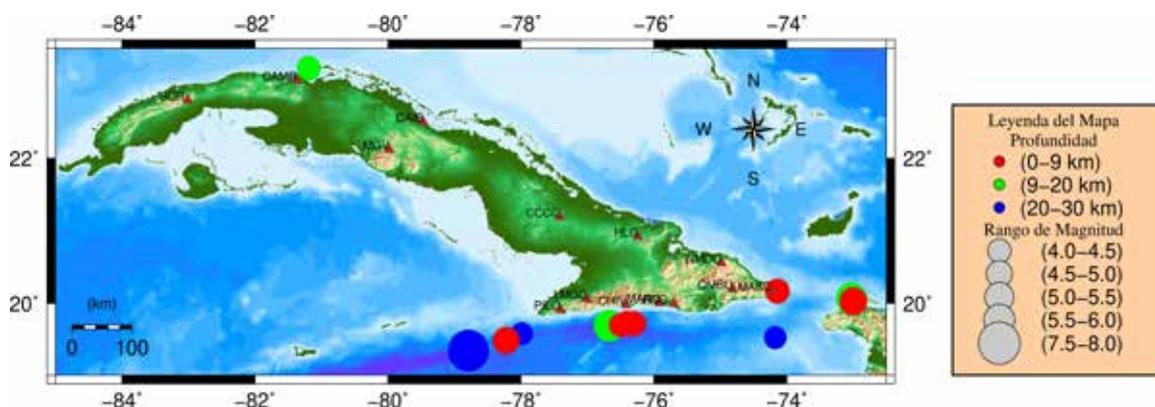


Figura 1. Mapa de Cuba con los 12 eventos perceptibles con $M_w \geq 4.3$, en el período 2017-2020. Fuente: Autores.

mayor será el alcance (Mahajan, Kumar y Arora, 2006). Esta relación para la región del Caribe fue propuesta por Álvarez y Chuy (1985) en la ecuación 1, basada en la ecuación de Kovesligethy, obtenida por Fedotov y Shumilina (1971) para la Kamchatka.

$$I=1.5 M-2.63 \log r-0.0087 r+2.5$$

donde $r = (D_i^2 + h^2)^{1/2}$, es la distancia hipocentral, h es la profundidad de foco, M la magnitud y D_i la distancia desde el epicentro al punto en que se calcula la intensidad I .

2.2. Herramienta computacional utilizada

En este trabajo se ha utilizado el *software* Intensity_Map (Palau *et al.*, 2019) el cual está implementado en lenguaje de programación Perl sobre sistema operativo Linux y se apoya en el Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel *et al.*, 2013) para optimizar la confección de los mapas. La herramienta permite estimar y generar cartográficamente las isosistas circulares correspondientes a un determinado sismo.

3. RESULTADOS Y DISCURSIÓN

A continuación, se muestran los resultados de aplicar el *software* Intensity_Map a los 12 eventos previamente seleccionados del catálogo cubano de terremotos y reportados por el Servicio Sismológico Nacional de Cuba luego de su revisión final. Además, se discuten las diferencias y similitudes entre los valores de las escalas MSK y EMS-98, y se brindan algunos «tips» que permiten tomar decisiones a la hora de utilizar una u otra.

3.1. Mapas de intensidades con isosistas teóricas

Se muestran varios mapas de intensidades: las Figuras de la 2 a la 13 representan las intensidades con las isosistas teóricas que se obtienen de manera automática con el *software* Intensity_Map.

Lo primero que se debe señalar, es que la Figura 2 muestra 51 puntos correspondiente a la información macrosísmica determinada en el terreno, resultado que no se pudo obtener para ninguno de los otros sismos. En la investigación de Palau *et al.* (2019), que antecedió a la que hoy se presenta, se analizaron e interpretaron algunas características propias del área, la cual manifiesta algunos efectos de sitio que favorecen la amplificación y atenuación de las ondas sísmicas.

En otro orden de ideas, hay que destacar que el nuevo catálogo macrosísmico que se presenta, corresponde a la última revisión y actualización del catálogo de sismos cubanos que se conserva en el Centro Nacional de Inves-

tigaciones Sismológicas (CENAI) (CENAI, 2021). Es válido realizar esta aclaración, debido a que usualmente la dinámica de trabajo del Servicio Sismológico Nacional Cubano (SSNC), implica que ante la ocurrencia de un sismo se emita un parte inmediato (Defensa Civil Nacional, Prensa Nacional y Medios de Comunicación) con los parámetros generales de localización y magnitud. Sin embargo, posteriormente estos parámetros se ajustan antes de almacenarlos en el catálogo final.

Es así que muchas veces, algunos investigadores asumen como datos oficiales los partes emitidos por la prensa en las primeras horas luego de ocurrido un sismo, considerando que los parámetros son totalmente correctos, cuando no es así. El catálogo cubano ya revisado y corregido se encuentra disponible en la web oficial del CENAI (www.cenai.cu).

Por otra parte, los mapas muestran el valor exacto de intensidad correspondiente a cada color en cada punto representado. Esto constituye una ventaja sustancial para la interpretación de manera rápida y efectiva de los posibles efectos de un evento sísmico. En este aspecto los resultados coinciden con los de Sandoval *et al.* (2012), que basa su potencialidad en la vasta red de acelerógrafos con que cuenta México.

De igual manera, los mapas de intensidades que se obtienen coinciden en calidad con los obtenidos por Schmidt (2014) y Pérez (2014). También se debe destacar, que en la actualidad esto se ha convertido en un requerimiento de primer orden (Worden *et al.*, 2016), pues las imágenes que provee serán usadas posteriormente en el análisis, planeamiento y toma de decisiones por las autoridades correspondientes.

Asimismo, algo a destacar, es que en Cuba actualmente no existe ninguna herramienta que permita la creación automática y en tiempo casi real de los mapas de intensidades, ni tampoco un catálogo macrosísmico actualizado con los mapas de intensidades. Únicamente se cuenta con un catálogo macrosísmico hasta el año 1990 y un atlas de isosistas (Chuy, 1996).

Consecuentemente, el nuevo catálogo se constituye en herramienta imprescindible para la sismología que se desarrolla en Cuba. Estos resultados facilitan la interpretación de estimados de peligrosidad sísmica como la intensidad máxima en el foco del terremoto y la confección de los planes de reducción de riesgos por las autoridades competentes.

3.2. Comparación entre los resultados teóricos y reales de los mapas de intensidades

Las Tablas 2 y 3 muestran los resultados de las comparaciones entre los valores reales de intensidad obtenidos en el terreno y los teóricos obtenidos con la herramienta

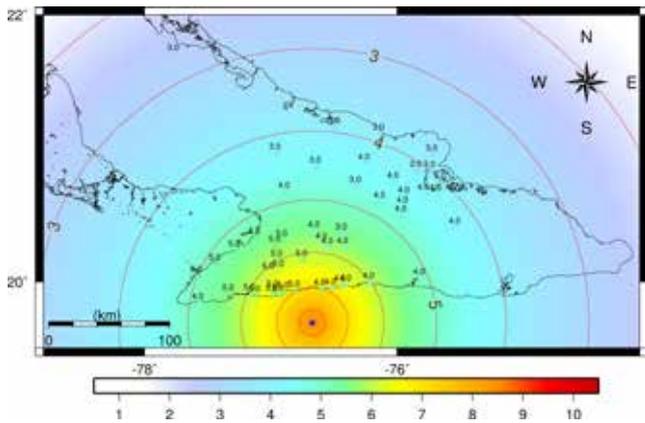


Figura 2. Isoisistas del terremoto del 17 de enero de 2017 ($M_w = 5.8$).
Fuente: Autores.

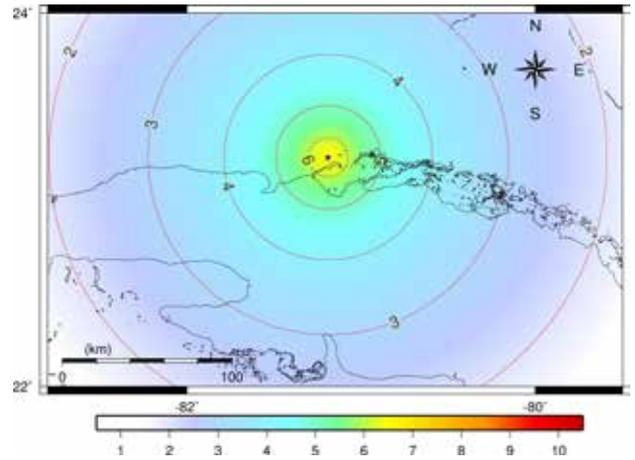


Figura 3. Isoisistas del terremoto del 30 de julio de 2017 ($M_w = 4.5$).
Fuente: Autores. ($M_w = 4.5$). Fuente: Autores.

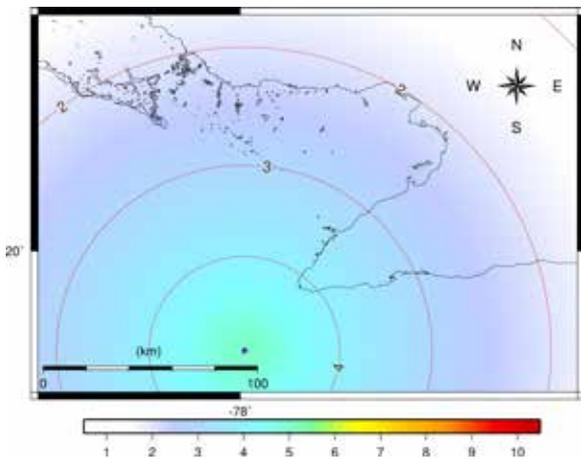


Figura 4. Isoisistas del terremoto del 9 de noviembre de 2017 ($M_w = 4.3$).
Fuente: Autores.

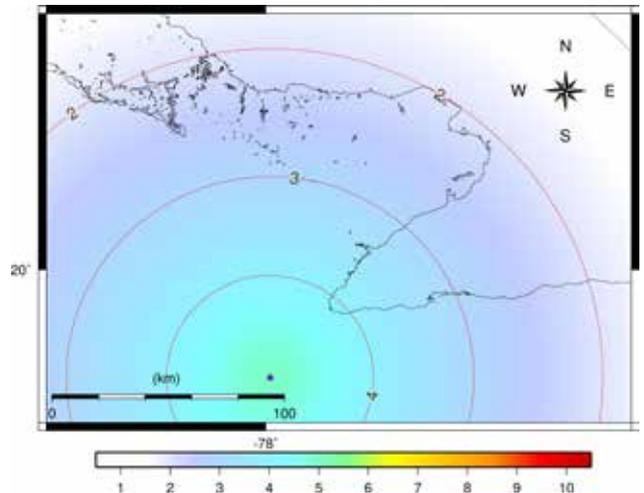


Figura 5. Isoisistas del terremoto del 6 de octubre de 2018 ($M_w = 5.9$).
Fuente: Autores.

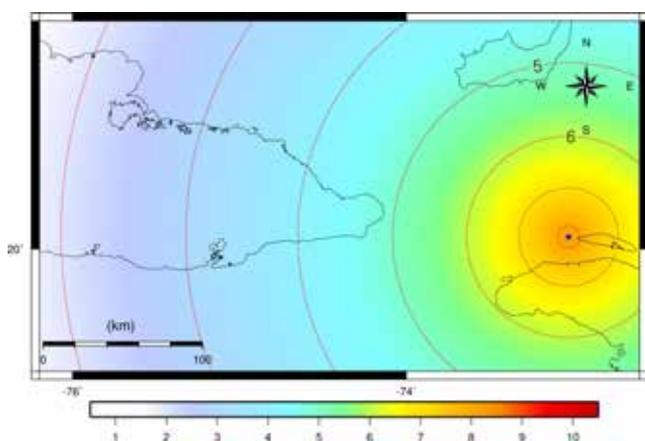


Figura 6. Isoisistas del terremoto del 7 de octubre de 2018 ($M_w = 5.2$).
Fuente: Autores.

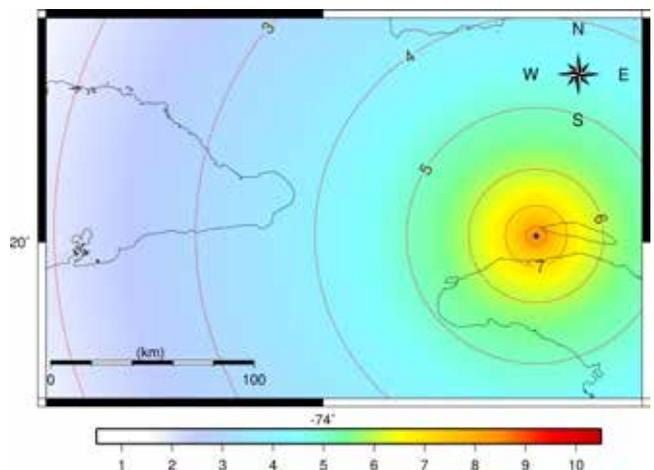


Figura 7. Isoisistas del terremoto del 5 de agosto de 2019 ($M_w = 4.3$).
Fuente: Autores.

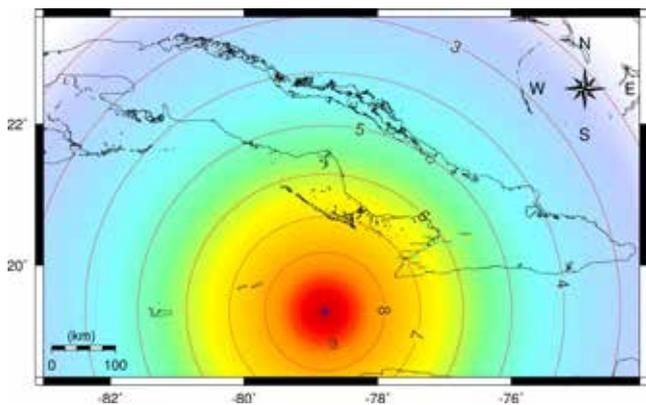


Figura 8. Isosistas del terremoto del 28 de enero de 2020, (Mw = 7.7).
Fuente: Autores.

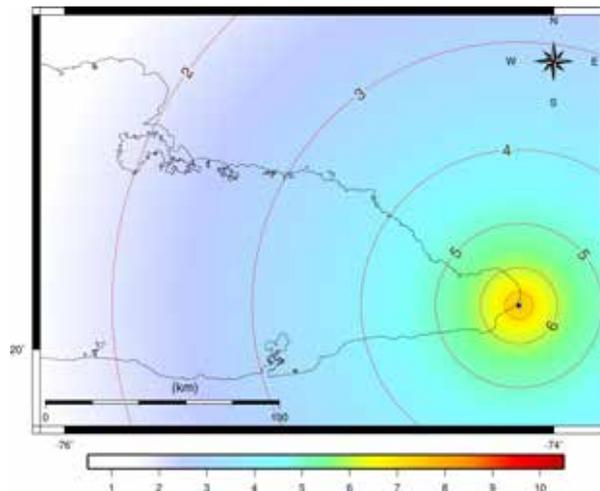


Figura 9. Isosistas del terremoto del 29 de abril de 2020 (Mw = 4.6).
Fuente: Autores.

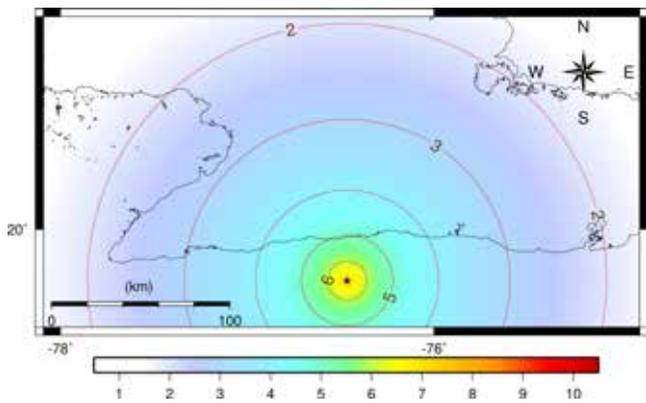


Figura 10. Isosistas del terremoto del 17 de mayo de 2020 (Mw = 4.3).
Fuente: Autores.

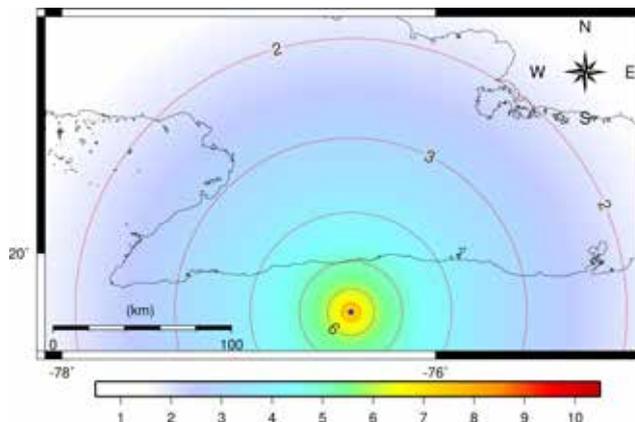


Figura 11. Isosistas del terremoto del 17 de mayo de 2020 (Mw = 4.6).
Fuente: Autores.

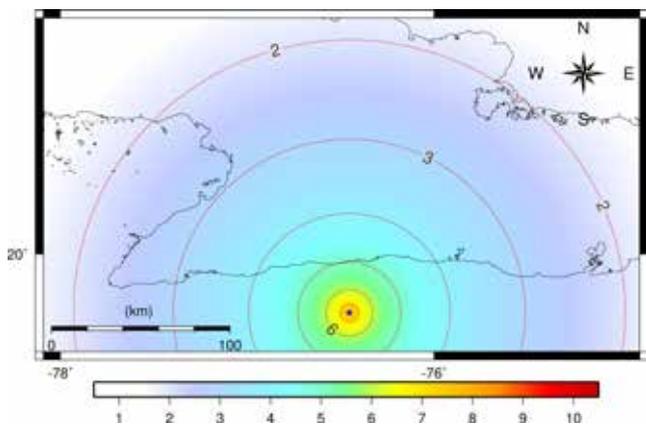


Figura 12. Isosistas del terremoto del 18 de mayo de 2020 (Mw = 4.4).
Fuente: Autores.

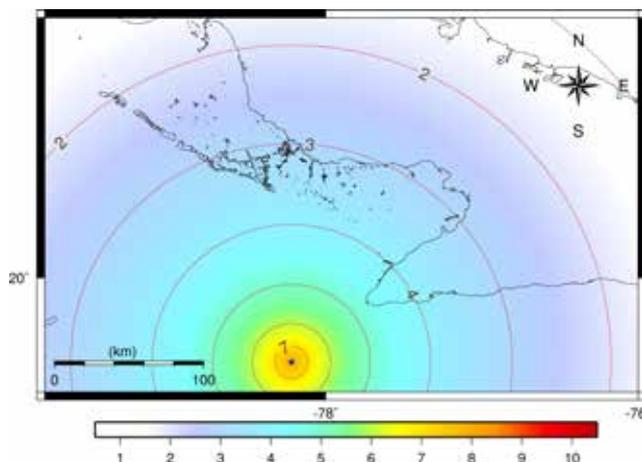


Figura 13. Isosistas del terremoto del 24 de julio de 2020 (Mw = 4.4).
Fuente: Autores.

computacional y mostrados en las figuras 2 y 8 respectivamente, además muestra en detalle todos los puntos (Localidad) que fueron visitados por el equipo que realizó el levantamiento macrosísmico.

En la Tabla 2 se muestra la comparación entre los resultados teóricos y reales del evento del 17/01/2017, y en la Tabla 3, la comparación entre los resultados teóricos y reales del evento del 28/01/2020, donde:

I_r : Intensidad real, percibida por la población
 I_t : Intensidad teórica.

Lo primero a señalar en los resultados que muestra la Tabla 2, es que este evento fue analizado anteriormente (ver Palau *et al.*, 2019, p.41), pero sólo se incluyeron 50 puntos hasta el valor de magnitud 3 y ahora se agregó un punto más con magnitud 2, que anteriormente no se conocía. Al analizar detalladamente, la estimación teórica coincide con la real en 15 puntos para un 30% de efectividad, lo que coincide con los resultados previos ya comentados. Sin embargo, al agregar el nuevo punto esta efectividad baja hasta un 28 %. En el caso de la Tabla 3 los valores coinciden en un sólo punto para una efectividad de 12.5%.

Por otra parte, en lo relacionado al evento de enero del 2017, cuando se realizó el primer análisis y se publicaron (Palau *et al.*, 2019, p.40), la efectividad se determinó considerando la escala MSK que es la que usa la herramienta computacional y era la vigente para los otros eventos analizados anteriores al del 2017. Sin embargo, los puntos macrosísmicos del evento en cuestión se obtuvieron usando la Escala EMS-98, actualmente vigente en Cuba. Este error asociado a los valores inciertos de la escala (4-5 MSK y 6-7 MSK) (Grünthal, 1998), para nada desestima los resultados del artículo previo, pues el objetivo fue validar la herramienta computacional comparándola con otra existente, y con ambas se utilizó el mismo criterio por lo que el error no influyó.

Otro aspecto importante, que no se puede obviar, es el factor humano. Si se considera que durante casi 30 años en Cuba se estuvo utilizando la escala MSK en los levantamientos macrosísmicos, es de suponer, que en algunos casos los especialistas cometan sesgos en la evaluación *in situ* de los daños al realizar las encuestas macrosísmicas. Es decir, en ocasiones evalúan utilizando la escala MSK y no la EMS-98 vigente. Algo similar, ocurre en el trabajo de Rosabal *et al.* (2021), quienes, aunque analizan un evento del año 2018, lo evalúan a partir de la escala MSK y no EMS-98.

Sobre este particular, se sugiere realizar encuestas y talleres a los especialistas e investigadores que realizan

esta actividad, con el objetivo de identificar los posibles sesgos y corregirlos en la práctica. Aquí se pudiera utilizar el software Intensity_Map como instrumento didáctico (Salgado *et al.*, 2014) para ejemplificar situaciones de eventos sísmicos. También podría aplicarse para detectar anomalías en la propagación de las ondas sísmicas en diferentes regiones, según lo sugerido por Cauzzi *et al.* (2014).

Ahora bien, en la presente investigación, sí se hace necesario corregir la incertidumbre en algunos valores al aplicar la escala MSK y EMS-98, pues el análisis de estos resultados, influye directamente en la actualización del catálogo macrosísmico cubano. Primero hay que precisar que Grünthal (1998) sugiere no realizar transposiciones de una escala a otra debido a lo complicado que pudiera ser la interpretación posterior. Sin embargo, da pautas válidas para en caso necesario asociar algunos valores entre las escalas MSK y EMS-98.

Por ejemplo: en «la mayoría de los casos no debería haber dificultad al convertir los valores MSK directamente en valores EMS. La diferencia más típica es que algunos valores inciertos tales como 4-5 MSK o 6-7 MSK seguramente serían asignados como 4 EMS o 6 EMS» (Grünthal, 1998, p.54). Asimismo: «A efectos prácticos, doce grados de intensidad deberían ser suficientes, y se recomienda que los usuarios no inviertan tiempo tratando de interpolar grados intermedios, aun en los casos donde tales grados puedan ser distinguidos. La práctica más robusta y simple es la de redondear hacia el grado inferior todas las intensidades "fraccionales" para obtener el valor entero de intensidad correcto. Por lo tanto, los efectos que correspondan a un grado intermedio entre 6 y 7 deberían asignarse a un valor 6 EMS» (Grünthal, 1998, p.61).

Considerando lo anterior, relacionado a las dos escalas, se pudo determinar nuevamente la efectividad en cuanto a la coincidencia de los valores teóricos y reales en ambos eventos. Si se observa la Tabla 2, aumentan los puntos de coincidencia hasta 44 (marcados en negrita), lo que establece el valor de efectividad en 86.27%. En el caso del evento del 2020 ocurre algo similar (ver Tabla 3), los puntos de coincidencia de valores de intensidad aumentan hasta seis (marcados en negrita) para una efectividad del 87.5%. Resultados similares, pero usando los mapas de isoaceleraciones fueron obtenidos por Rosabal *et al.* (2021), quienes establecen una correspondencia entre las aceleraciones reales y los valores de intensidad reales.

En otro orden de ideas, hay que señalar que en la zona donde se realizaron los estudios macrosísmicos correspondientes a los eventos del 17/01/2017 y 28/01/2020, se ha documentado en varias investigaciones (Gutiérrez, 2017; Palau *et al.*, 2019) la existencia de efectos de sitio que provocan la amplificación o atenuación de las ondas sísmicas y por consiguiente valores de Intensidad, que no

Lat N	Lon W	Localidad	IR	IT		Lat N	Lon W	Localidad	IR	IT
20.070	77.006	Las Mercedes	6	6		20.502	75.958	Alto Cedro	4	4
20.087	76.927	Providencia	6	6		20.385	76.643	Bayamo	4	5
20.045	77.576	Niquero	5	5		20.298	76.585	San Lorenzo	4	5
20.137	77.430	Media Luna	5	5		20.258	76.537	Guisa	4	5
20.239	77.276	Campechuela	5	5		20.261	76.418	Charco Redondo	4	5
20.335	77.117	Manzanillo	5	5		20.678	76.882	Vado del Yeso	4	4
19.906	77.324	Pilón	5	5		20.665	75.777	Guaro	4	4
19.911	77.155	Mota Uno	5	6		20.747	75.648	Guatemala	4	4
19.899	77.115	Camaroncito	5	6		20.660	75.679	Mayarí	4	4
19.904	76.980	Magdalena	5	6		20.653	75.534	Levisa	4	4
19.936	76.972	Macagual	5	6		20.410	75.531	Mayarí Arriba	4	4
19.904	76.928	La Palmita	5	6		20.568	75.944	Marcané	4	4
19.926	76.890	La Plata	5	6		20.643	75.934	Cueto	4	4
19.936	76.802	Ocujal	5	6		20.754	76.018	Baguanos	4	4
20.167	76.744	Minas de Buey Arriba	5	6		20.891	76.251	Holguín	4	4
20.167	76.94	Bartolomé Maso	5	5		20.868	76.633	Buenaventura	3	4
20.273	76.956	Yara	5	5		20.720	76.318	Cacocún	3	4
20.316	76.900	Veguitas	5	5		21.164	76.482	Jesús Menéndez	3	3
19.946	76.598	Uvero	4	7		21.114	76.132	Gibara	3	3
19.953	76.514	Bayamita	4	6		20.960	75.711	Banes	3	3
19.978	76.440	Calentura	4	6		20.836	75.730	Antilla	3	4
19.981	76.394	Chivirico	4	6		20.368	76.429	Jiguaní	3	5
19.998	76.212	El Francés	4	6		20.968	76.953	Las Tunas	3	4
20.028	75.809	Santiago de Cuba	4	5		21.711	77.758	Cubitas	3	2
20.606	76.124	Urbano Noris	4	4		20.839	75.838	Deleite	2	4
19.84	77.563	Cabo Cruz	4	5						

Tabla 3. Comparación entre los resultados teóricos y reales del evento del 28/01/2020. Fuente: Autores.

Lat N	Long W	Localidad	IR	IT
20.045	77.576	Niquero	6	7
20.385	76.643	Bayamo	6	6
19.966	77.416	Sevilla	6	7
19.906	77.324	Pilón	6	7
20.137	77.430	Media Luna	5	7
20.239	77.276	Campechuela	5	6
20.335	77.117	Manzanillo	5	6
20.273	76.956	Yara	5	6

se corresponden con los estimados para algunos puntos determinados.

Otro factor que influye en que no haya una mayor coincidencia entre los valores reales y estimados, es que la cantidad de puntos macrosísmicos con los que se cuenta es poca, y no permite ajustar nuevas ecuaciones de atenuación para la región suroriental de Cuba. Lamentablemente, por cuestiones económicas no siempre se pueden visitar todas las localidades donde se tuvo reportes de perceptibilidad o daños.

No obstante, actualmente se están desarrollando herramientas de consulta vía web y aplicaciones para celulares con sistema Android, para obtener mayor información. Que por supuesto, este proceso no es inmediato, pues requiere capacitar a los responsables de aglutinar los datos en cada localidad. De lo contrario los reportes no serán confiables.

4. CONCLUSIONES

El nuevo catálogo macrosísmico de terremotos perceptibles, permite visualizar los valores teóricos de intensidades, lo que facilita la toma de decisiones a las autoridades pertinentes, pudiéndose considerar como una alternativa factible al no realizarse la macrosísmica correspondiente a cada evento perceptible en Cuba.

Además, complementa las evaluaciones del campo macrosísmico de Cuba a partir de interpretar el comportamiento de la atenuación sísmica, con fines de mejorar los estimados de peligrosidad sísmica.

Los resultados evidencian la factibilidad de Incluir el *software* Intensity_Map en la rutina diaria del Servicio Sismológico-

co Nacional Cubano, para que de manera automática se generen los mapas de intensidades teóricos ante la ocurrencia de un sismo. Lo que puede servir de apoyo a los especialistas en las expediciones macrosísmicas para saber a qué zonas dirigirse inicialmente y en qué valores de intensidad deberían enfatizar la búsqueda.

5. RECOMENDACIONES

Se sugiere realizar nuevos estudios geofísicos y sismológicos para caracterizar mejor los posibles efectos de sitio principalmente en el suroeste de la región oriental de Cuba. Además, analizar la posibilidad de convertir los valores de intensidad teóricos y reales en aceleraciones para generar un nuevo mapa y compararlo con los datos de la red de acelerógrafos de Santiago de Cuba.

Sería prudente recalculer los coeficientes de la ecuación del campo macrosísmico para el Caribe propuesta por Álvarez y Chuy (1985), a partir de los valores de intensidad reportados en los eventos recientes, utilizando la escala EMS-98, con el objetivo de optimizar el ajuste entre las estimaciones teóricas y los valores reales macrosísmicos.

6. REFERENCIAS

- Álvarez, J.L. y Chuy, T.J. (1985). Isoleismal model for Greater Antilles. Proceedings of the 3rd International Symposium on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk, Liblice Castle, Czechoslovakia, pp. 134-141.
- Ambraseys, NN. y Douglas, J. (2004). Magnitude calibration of north Indian earthquakes. Geophys. J. Int. 159, 165–206. Doi: 10.1111 / j.1365-246X.2004.02323.x. [Consultado el: 12 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://academic.oup.com/gji/article/159/1/165/576014>
- Arango, ED., González, OF., Palau, R. y Arias, M. (2017). Evaluación del comportamiento de la actividad sísmica de Corralillo, Villa Clara, Cuba iniciada el 9 de enero de 2014. Ciencias de la Tierra y el Espacio. Vol.18, No.1, enero-junio, pp.71-85. [Consultado el: 12 de diciembre de 2021]. Disponible en: http://www.iga.cu/wp-content/uploads/2019/05/actividad.sismica.corralillo.cuba_.pdf
- Bolt, BA. (1982). Terremotos. Editorial Reverté, Barcelona. ISBN 978-84-291-4602-8. [Consultado el: 10 de enero de 2022]. Disponible en: https://www.reverte.com/libro/terremotos_91636/
- Cauzzi, C., Edwards, B., Fäh, D., Clinton, J., Wiemer, S., Kästli, P. y Giardini, D. (2014). New predictive equations and site amplification estimates for the next-generation Swiss ShakeMaps. Geophys. Jour. Int. Vol. 200, No.1, pp. 421-438. [Consultado el: 15 de enero de 2022]. Disponible en: <https://academic.oup.com/gji/article/200/1/421/576014>

- com/gji/article/200/1/421/753291?login=false
- CENAI: Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. (2017). Informe sobre macrosísmica realizada para el sismo del 17 de enero de 2017. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. [Consultado el: 10 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.cenais.cu>
- CENAI: Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. (2020). Informe sobre macrosísmica realizada para el sismo del 28 de enero de 2020. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. [Consultado el: 10 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.cenais.cu>
- CENAI: Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. (2021). Sismicidad registrada en el territorio nacional. Fondos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. [Consultado el: 10 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.cenais.cu/cenais/index.php/cronologia-de-notas-informativas/#>
- CERESIS: Centro regional de sismología para América del Sur. (2004). Desarrollo de una plataforma en software libre para el manejo de catálogos de intensidades sísmicas vía web. [Consultado el: 18 de diciembre de 2021]. Disponible en: <http://www.ceresis.org/descargas/proyectos-ejecutados/DESARROLLO-DE-UNA-PLATAFORMA-EN-SOFTWARE-LIBRE-INTENSIDADES.pdf>
- Chuy, T.J. (1996). Atlas de Isosistas de las Antillas Mayores. Reporte de Investigación. Fondos del CENAI. Categoría de Mención en XI Fórum Nacional de Ciencia y Técnica, 1996.
- Chuy, T.J. (1999). Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de Peligrosidad y Microzonación sísmica. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del Ministerio de Educación Superior (MES) y del CENAI. Cuba. [Consultado el: 4 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://www.cenais.cu/cenais/index.php/tesis-de-grado-cientifico/>
- Cotilla, M.O., Córdoba, D. y Álvarez, L. (2021). Historia de la sismicidad del segmento Islas Caimán-Cabo Cruz (Cuba), en el marco de la zona de entre placas Norteamérica-Caribe. Revista Tierra, Vol. 1, No.1, pp.1-11. [Consultado el: 25 de abril de 2022]. Disponible en: https://revistatierra.unan.edu.ni/index.php/revista_tierra/article/view/25
- Fedotov, S.A. y Shumilina, L.S. (1971). Sacudibilidad Sísmica de la Kamchatka. Noticias de la AC de la URSS, Fizika Zemli. No.9, pp. 3-15.
- Ghosh, G.K. y Mahajan, A.K. (2013). Intensity attenuation relation at Chamba-Garhwal area in north-west Himalaya with epicentral distance and magnitude-Jour. Eart. Syst. Sc. Vol.122, No.1, pp. 107-122. [Consultado el: 15 de marzo de 2022]. Disponible en: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013JESS..122..107G/abstract>
- Gorina, A., Alonso, I. y Salgado, A. (2017). Visualización de información y de conocimiento en la formación universitaria. Un acercamiento desde la pedagogía. Revista Conrado, Vol.13, No. 59, pp.7-15. [Consultado el: 15 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://conrado.ucf.edu.cu/index.php/conrado/article/view/513>
- Gutiérrez, A. (2017). Evaluación de riesgo por licuefacción en los municipios de Guamá, tercer Frente y Contra maestre de la provincia de Santiago de Cuba. Trabajo de Diploma para optar por el título de Ingeniero Geólogo. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa «Dr. Antonio Núñez Jiménez», Facultad de Geología y Minería Departamento de Geología. [Consultado el: 25 de enero de 2022]. Disponible en: <https://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1207/TesisAlisneydisGutierrez.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Grünthal, G. (1998). European Macroseismic Scale 1998, EMS-98. Conseil de L'Europe Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol.15, Luxembourg. 99p. [Consultado el: 10 de febrero de 2022]. Disponible en: https://www.franceseisme.fr/EMS98_Original_english.pdf
- Linkimer, L. (2008). Application of the Kriging Method to Draw Isoleismal Maps of the Significant 2002-2003 Costa Rican Earthquakes. Revista Geológica de América Central, 38, pp. 119-134. [Consultado el: 10 de febrero de 2022]. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/4220/4044>
- Mahajan, A.K., Kumar, N. y Arora, B. (2006). Quick Look Isoseismal Map of October 2005 Kashmir Earthquake (PDF), Current Science, 91 (3): 356-361, JSTOR 24094145. [Consultado el: 10 de febrero de 2022]. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/24094145>
- Medvedev, S.V. (1968). Escala Internacional de Intensidad Sísmica. [en ruso]. En: Regionalización Sísmica de la URSS, Nauka, Moscú.
- Moreno, M., Grandison, M. y Atakan, K. (2002). Crustal velocity model along the southern Cuban margin: implications for the tectonic regime at an active plate boundary, Geophysical Journal International, Volume 151, Issue 2, November, pp.632-645. [Consultado el: 10 de febrero de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01810.x>
- ONN: Oficina Nacional de Normalización. (2017). Norma Cubana NC 46:2017: Construcciones Sismorresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción.
- Palau R., Moreno, B. y Blanco MA. (2006). Modelo de velocidades sísmicas de Cuba Oriental. Revista Geológica de América Central, No. 34-35, pp.109-119. [Consultado el: 10 de noviembre de 2021]. Disponible en: http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2006_PalauClares_Modelo%20de%20vel%20sismicas%20de%20Cuba%20Oriental.pdf
- Palau, R., Porras, J.L., Chuy, T.J. y Salgado A. (2019). Estimación cartográfica de las intensidades de terremotos ocurridos en la región suroriental de Cuba. Mapping: Revista Internacional de Geomática y Ciencias de la Tierra. No.196, mayo-junio, pp. 34-43. [Consultado el: 10 de noviembre

- de 2021]. Disponible en: <http://ojs.revistamapping.com/index.php?journal=MAPPING&page=article&op=view&path%5B%5D=206>
- Palau, R., Tuan, TT. y Salgado, A. (2018). Determinación automática del umbral de detección de una red sismológica. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*. Vol.12, No.3, julio-septiembre, pp.78-92. [Consultado el: 10 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://rcci.uci.cu/?journal=rcci&page=article&op=view&path%5B%5D=1671&path%5B%5D=644>
- Pecker, A., Faccioli, E., Gurpinar, A., Martin, C. y Renault, P. (2017). Una descripción general del proyecto de investigación SIGMA. Ingeniería geotécnica, geológica y sísmica. Springer International Publishing, pp. 141-146. Doi: 10.1007/978-3-319-58154-5_8.
- Pérez, L. (2014). Implementación y afinación de ShakeMap para Latinoamérica. El caso de Panamá. [Consultado el: 20 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/266080847,Doi:10.13140/2.1.3156.0967>
- Porras, JL. (2017): Atenuación sísmica en Costa Rica a partir de intensidades y Coda Q. Tesis para optar por el grado académico de Licenciado en Geología. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio Julio. Costa Rica.
- Rosabal, SY., Palau, R., Cutié, M., Oliva, R., Rivera, Z. y Villalón, M. (2021). Aceleraciones del terremoto del 27 de febrero de 2018 obtenidas por la red acelerográfica de la ciudad de Santiago de Cuba. *Revista Minería y Geología*, Vol. 37, No. 3, pp. 274-284. [Consultado el: 25 de abril de 2022]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/2235/223568401002/223568401002.pdf>
- Salgado, A., Alonso, I. y Gorina, A. (2014). Ejemplificación de la solución algorítmica de problemas de programación computacional. *Revista Didasc@lia: Didáctica y Educación*. Vol. 5, No. 4, octubre-diciembre, pp. 15-36. [Consultado el: 25 de abril de 2021]. Disponible en: <https://revistas.ult.edu.cu/index.php/didascalia/article/view/319/317>
- Salgado, A. Palau, R., Chuy, TJ. y Rosabal, SY. (2021). Herramienta computacional para la gestión de mapas de intensidades sísmicas en tiempo real. XV Congreso de Informática y Geociencias, GEOINFO 2021. IX Convención Internacional de Ciencias de la tierra «Geociencias'2021». Cuba.
- Salcedo, E. de J., Blandón, JC. y Ríos, L. (2021). Reevaluación de intensidades macrosísmicas del terremoto del 07 de junio de 1925 en Colombia. *Boletín de Geología*, 43(3), 35-61. [Consultado el: 8 de julio de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n3-2021002>
- Sandoval, H., Alcántara, L., Arroyo, D., Delgado, MR., Ordaz, M., Pérez, C., Quiroz, A. y Ruiz, AL. (2012). Generación de mapas de intensidades sísmicas en tiempo real para el territorio nacional. [Consultado el: 10 de enero de 2022]. Disponible en: <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/BancoDeInformacion/Bancodelimagenes/Documents/mapasdeintensidad.pdf>
- Schmidt, V. (2014). Ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para América Central, con datos de 1972 a 2010. *Rev. Geol. Amér. Central*. No.50, pp.7-37. [Consultado el: 10 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45433962001>
- Villalón, M. y Palau, R. (2018). Relaciones empíricas entre las magnitudes mb/Ms, Ms/Mw y mb/Mc para el área de Cuba, Jamaica y La Española. *Minería y Geología*, 34(2), pp. 167-176, abril-junio. [Consultado el: 5 de noviembre de 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Raul-Palau-Clares-2/publication/326782345_Relaciones_empiricas_entre_las_magnitudes_mbMs_MsMw_y_mbMc_para_el_area_de_Cuba_Jamaica_y_La_Espanola/links/5be1b5dc92851c6b27ab0bf3/Relaciones-empiricas-entre-las-magnitudes-mb-Ms-Ms-Mw-y-mb-Mc-para-el-area-de-Cuba-Jamaica-y-La-Espanola.pdf
- Wessel, P., Smith, WHF., Scharroo, R., Luis, J. y Wobbe, F. (2013). Generic Mapping Tools: Improved version released, *Eos*, Vol. 94, No. 45, 5 November, pp.409-420. Doi: 10.1002/2013EO450001. [Consultado el: 10 de enero de 2022]. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013EO450001>
- Worden, BC., Wald, DJ., Quitoriano, V. y Pankow, KL. (2016). ShakeMap Manual Online: technical manual, user's guide, and software guide, U.S. Geological Survey. [Consultado: 10 de enero de 2022]. Disponible en: usgs.github.io/shake-map,Doi:10.5066/F7D21V PQ

Sobre los autores

Antonio Salgado Castillo

Licenciado en Ciencia de la Computación y Máster en Neurofísica y Neuroingeniería. Doctor en Ciencias por la Universidad de Oriente, Cuba. Autor de varias publicaciones en revistas y eventos internacionales. Se desempeña como Investigador Auxiliar en el Grupo de Física de los Terremotos del Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Cuba.

Raúl Palau Clares

Licenciado en Física y Máster en Ciencias de la Computación. Aspirante a Doctor en Ciencias Geofísicas por el Instituto Superior José Antonio Echavarría, Cuba. Autor de varias publicaciones en revistas y eventos internacionales. Se desempeña como Investigador Auxiliar en el Grupo de Física de los Terremotos en el Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Cuba.



Los Terremotos y sus primeros estudios en el Instituto Geográfico: Observatorios, Mapa Sismotectónico y Catálogo Sísmico.

MARIO RUIZ MORALES

RESUMEN

La sacudida del terremoto es una de las causas que provoca mayor sobresalto tanto a los hombres como a los animales. Su origen ha sido incierto a pesar de que durante milenios haya sido considerado un fenómeno meteorológico. Sin embargo, a raíz del catastrófico sismo de Lisboa (1755), que conmocionó a Europa, se despertó el interés por estudiar tan singular manifestación desde un punto de vista más racional; fue a partir de entonces cuando la sismología comenzó a tomar carta de naturaleza. España se incorporó formalmente a tales estudios a raíz del terremoto de Andalucía (1884) y a través del Instituto Geográfico y Estadístico (1873). Los principales protagonistas de todos ellos fueron los Ingenieros Geógrafos, Cuerpo directivo de dicho centro desde que fueron creados en el año de 1900; siendo pioneros los cuatro siguientes: Eduardo Mier y Miura, José Galbis Rodríguez, Vicente Inglada Ors y Alfonso Rey Pastor.

ABSTRACT

The shock of the earthquake is one of the causes that causes the greatest shock to both men and animals. Its origin has been uncertain despite the fact that for millennia it has been considered a meteorological phenomenon. However, as a result of the catastrophic Lisbon earthquake (1755), which shocked Europe, interest was aroused in studying such a singular manifestation from a more rational point of view; It was from then on that sismology began to take its nature. Spain was formally incorporated into such studies following the earthquake in Andalusia (1884) and through the Instituto Geográfico y Estadístico (1873). The main protagonists of all of them were the Ingenieros Geógrafos, the governing body of said center since they were created in 1900; the following four being pioneers: Eduardo Mier y Miura, José Galbis Rodríguez, Vicente Inglada Ors and Alfonso Rey Pastor.

Palabras clave:

Terremotos, Sismología, Geodesia

Keywords:

Earthquakes, Sismology, Geodesy

El temblor de tierra es quizás el fenómeno telúrico que más ha sobrecogido y sobrecoge al hombre. Sus orígenes han estado asociados durante milenios a la meteorología aunque tal hipótesis ya está universalmente superada, no obstante la inercia hace que todavía se relacione con los cambios atmosféricos¹. La explicación es simple, ya que en la Grecia clásica trataban de explicar así esos sucesos. En efecto, el pensamiento sismológico aristotélico quedó plasmado en su tratado Meteorológicos, escrito en torno al año 350 a.C., y más concretamente en los capítulos VII y VIII de su libro II. Gracias a él se tuvieron noticias de las contribuciones previas de Anaxágoras, Anaxímenes y Demócrito. Aristóteles asociaba los terremotos con los vientos, creyendo que los temblores podían ser de dos tipos: secos y húmedos. A su juicio, la mayoría se producía en tiempos de calma y durante la noche, aunque algunos pudiesen ocurrir también a mediodía. Las épocas más propicias para su percepción eran los equinoccios, todo lo contrario de lo que sucedía con las otras dos estaciones, por tratarse de periodos poco ventosos. Llama la atención que usara en sus explicaciones el símil humano, en donde por el efecto de los gases se producían espasmos, estremecimientos y palpitaciones. La posterior difusión de esta contribución de Aristóteles fue favorecida por su traducción al árabe, incluida en el texto Al'thaar Al'ulwiyyah, realizada en Antioquía por Yahya ibn al-Bitric, en el año 800. Cuatro siglos después fue traducida al latín por Gerardo de Cremona, propiciando así su introducción definitiva en el occidente cristiano, a través de la versión mejorada del prolífico traductor flamenco William de Moerbeke. En el

primer siglo de nuestra era escribió Cayo Plinio Segundo su celebrada Historia Natural, dedicando a los terremotos los capítulos LXXIX y LXXXII, ambos incluidos. En el primero de ellos apuntaba que según él, el sismo era debido al viento: «porque jamás tiembla la tierra sino habiendo en el mar bonanza y estando tan sosegado el cielo que apenas pueden en él sustentarse las aves y nunca sino habiendo precedido vientos que entonces se esconden en las venas y concavidades escondidas. Y no es otra cosa temblor de tierra sino lo que trueño en la nube, ni acontece de otra manera que cuando el rayo sale, peleando el aire encerrado en la nube y procurando su libertad». Más adelante habla de los sucesos premonitorios, concretamente de unas señales celestes: «muéstrase, asimismo, en el cielo precediendo al movimiento que ha de suceder de día, o poco después de puesto el Sol,..., una nube a manera de línea delgada extendida por largo espacio, y aún sale el agua que sacan de los pozos más turbia que otras veces y no sin alguna manera de mal olor». En cuanto a los remedios contra los terremotos se concentraron en primer lugar en los pozos, «como también en haber muchas cuevas por do se exhale el viento ya concebido y esto se ve claro en ciertos pueblos, los cuales por estar

muy minados para expeler las inmundicias, son menos aquejados de ellos, y en unas mismas poblaciones están más seguros los lugares sotanados por debajo, que no los macizos...cesa el terremoto acabado de respirar y salir el viento. Y si dura, no cesa antes de cuarenta días y muchas veces más, como haya acontecido duran uno y dos años». En los siglos siguientes se mantuvieron intactas tales teorías, prácticamente hasta la llegada de la Ilustración, con el agravante de permanecer latente el terror ancestral tanto a los terremotos como a los eclipses, por considerar a ambos manifestaciones sobrenaturales con las que Dios pretendería castigar a los hombres que había creado a su imagen y semejanza. Por otro lado, se comprende que durante ese periodo histórico resulta sumamente dificultosa que pudiera aportar al estudio de la sismicidad histórica alguna novedad, ya que la información al respecto además de escasa está siempre sesgada por ceñirse en gran medida a la exclusiva localización de la corte. No obstante, hay una excepción muy notable fechada a mitad del siglo XVI, concretamente la relativa al gran terremoto del año 1356 que destruyó la ciudad de Basilea; el sismo mejor documentado en la sismicidad histórica de Suiza.



Cosmographia Universalis (1552). Liber tertius. Descriptio Germanicae nationis. Sebastian Münster.

¹ En algunos informativos se le pregunta al «hombre del tiempo» por los terremotos.

Gracias a sus múltiples referencias² pudieron evaluarse sus principales parámetros, desde su fecha exacta, el 18 de octubre, hasta la magnitud de momento, entre 6 y 7.1. Fijándose las coordenadas geográficas del epicentro en los valores siguientes: $\lambda = 47^{\circ} 30'$ y $\phi = 7^{\circ} 36'$ EG. El sismo principal se produjo a las 22h, con premonitores entre las 19h y las 20h, y las réplicas correspondientes durante toda la noche, con una sacudida especialmente violenta hacia la mitad de la misma. La ciudad quedó arrasada por el incendio que siguió al terremoto principal, agravado por ser la mayoría de las construcciones de madera. Todas las grandes iglesias y castillos resultaron destruidos en un radio de 30 km, estimándose en 300 el número de víctimas mortales en Basilea. La intensidad se situó entre los grados IX y X de la escala MSK³. Incluso llegó a relacionarse la causa de este terremoto con una falla normal al sur de la ciudad, orientada en dirección NNE-SSW, que pudiera extenderse bajo la misma. En el aspecto iconográfico son múltiples los ejemplos que lo representaron desde incunables, como el *Konstanzer Weltchronik*, hasta la celebrada *Cosmographia Universalis* de Sebastian Münster. Es sorprendente como en pleno siglo XIX todavía seguían apareciendo imágenes alegóricas del terremoto, así deben considerarse los cuadros debidos a Karl Jaustin y a Ernst Stuckelberg.

Alcanzado el siglo XVI se debe subrayar uno de los primeros ensayos sobre la sismicidad histórica de la Península Ibérica, del que fue autor el jesuita Juan

² Aparte de las crónicas que se hicieron inmediatamente después de la catástrofe, se pudo contar con más de 1350 documentos escritos a lo largo de los siglos XV, XVI, XVII y XVIII.

³ Esa denominación responde a las iniciales de los apellidos de los tres sismógrafos siguientes: Serguei Medvedev, Wilhelm Sponheuer y Vit Karnik. Esta escala es similar a la de Mercalli modificada. Los grados se fijaron tras analizar los daños ocasionados en los castillos de la región (entre 30 y 40).

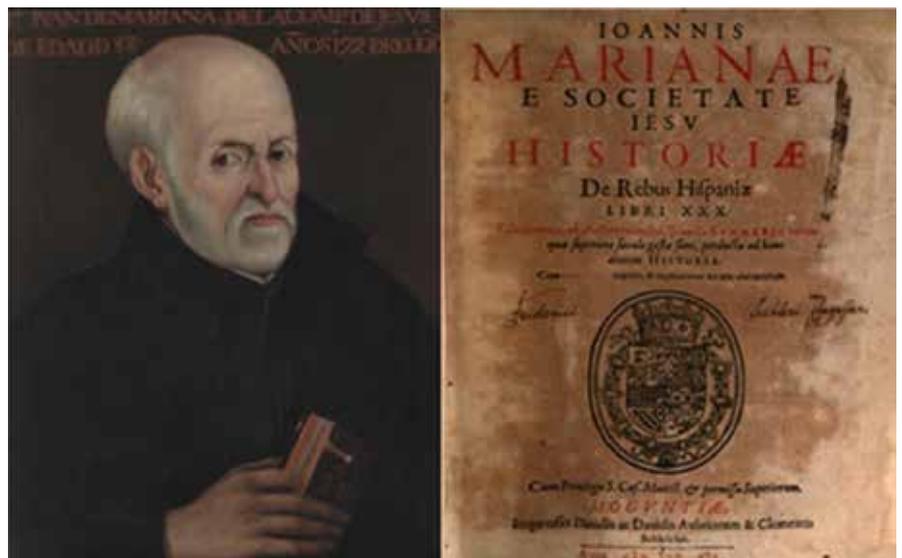
de Mariana (1536-1624). La primera catástrofe de la serie es la que se produjo, al parecer, el año 405 de la fundación de Roma⁴, padeciendo la población de Sagunto la ruina mayor. No obstante, la descripción del fenómeno fue demasiado genérica: «después de extraordinarias inundaciones con increíble daño de los ganados, campos y edificios, padecieron violentos terremotos todas las ciudades que están a orillas del Océano y Mediterráneo». Mariana dio también noticias acerca de otras desgracias que padeció la península, contándose entre ellas «los ordinarios temblores de tierra, con los cuales una parte de la isla de Cádiz, dice, se abrió y hundió en el mar». Cuando Aníbal salió de Hispania, en el año 218 a.C., también se soportaron «varias enfermedades, pestes, temblores de tierra y tormentas».

Se abre entonces un paréntesis en la crónica sísmica, el cual no se cerró hasta que se refirió el terremoto de Lisboa del año 1344, reinando Alfonso IV: Al pare-

⁴ Dando por sentado que Rómulo fundase la ciudad de Roma en el año 753 a.C. el terremoto habría tenido lugar en el año 348 a.C.

cer fue acompañado de un ruido ensordecedor y de continuas sacudidas de sus edificios, llegando a colapsar el cimborrio de su iglesia mayor. El mismo autor recoge asimismo el que se registró en 1356: «...con grande daño de las ciudades marítimas, cayeron las manzanas de hierro que estaban en lo alto de la torre de Sevilla⁵; y en Lisboa derribó este terremoto la Capilla mayor, que pocos días antes se acabara de labrar por mandado del Rey Don Alfonso». A finales del siglo, en diciembre de 1395, quedó muy afectado por otro sismo la mayoría del reino de Valencia, «con tanta desolación de los vivientes y los edificios, que era maravilla y lástima». Destaca, en este relato histórico, el gran terremoto del año 1531, el cual no solo fue notado en toda la península; Mariana señalaba que gran parte de los diques de Flandes resultaron afectados, quedando muchos lugares anegados con las olas del mar. A tenor de su

⁵ En la crónica de Ibn Sahib al-Salá se cuenta que las obras de la Torre de la Giralda concluyeron el 10 de marzo de 1198, con la colocación de cuatro bolas de bronce dorado en el remate superior de la misma (Falcón Márquez, Teodoro. La Giralda. Diputación de Sevilla, Área de Cultura.)



Juan de Mariana y su libro sobre la Historia de España. En él incluyó una relación de los terremotos históricos que asolaron la península ibérica. El libro se editó en Maguncia en el año 1605, pero mientras tanto fue traduciendo la obra al castellano, publicándose en Toledo en el año 1601.

testimonio, los mayores efectos se apreciaron en Lisboa⁶, donde la madre por la que circulaba el Tajo «se hinchó de tal manera que, apartándose las aguas de la una y otra parte, parecía resultar una manera de isla»; se estima que quedaron arruinadas 1400 casas, quedando 600 más incapaces de ser habitadas, siendo muchas las iglesias que se derrumbaron.

A pesar de ser una iniciativa tan limitada en su extensión, parece obligado señalar su mérito por haberse adelantado a su tiempo, baste decir que hubo de esperar más de trescientos años para que se publicara en España el primer catálogo sísmico⁷. La sismicidad histórica es una materia multidisciplinar que requiere generalmente la colaboración de disciplinas cuya independencia es solo aparente: geógrafos, geólogos, historiadores e ingenieros. Así lo ponía de manifiesto el hispanista francés Bernard Vincent, en una fecha tan reciente como el año 1996, al publicar su artículo *Les tremblements de terre en Espagne et au Portugal*⁸: «L'une des tâches impérieuses qui nous incombe est la constitution de catalogues des événements séismiques du passé. Il en existe plusieurs, parfois anciens et toujours établis par des ingénieurs, des géophysiciens ou des géologues soucieux de disposer de sources à partir desquelles ils peuvent mieux cerner les risques aujourd'hui encourus».

Vincent reconoce el interés de los trabajos publicados, aunque los critique sin disimulo: «À l'ouvrage classique mais très défectueux de José Galbis Rodríguez est venu s'ajouter le répertoire de

Julio Mezcua et José Manuel Martínez⁹, imparfait, mais bien meilleur. Ce qui est surprenant, c'est de voir des chercheurs oublier ce dernier travail et continuer à citer des erreurs manifestes de Galbis¹⁰». Su crítica se compadece poco con la posibilidad de haber enriquecido el interesante listado de terremotos que aporta con las intensidades que figuraban en los trabajos de los ingenieros geógrafos que decía conocer. Por lo demás, el carácter multidisciplinar ya citado se evidencia en la propia obra de Vincent, pues no se refirió en su artículo a un terremoto sumamente conocido en la historia sísmica de Granada, ocurrido en el año 1431, y analizó superficialmente otro aún más relevante producido en el año 1494. El primero, ya mencionado en la Catálogo de Galbis, tiene connotaciones históricas por asociarse a la batalla de la Higuera, la cual tuvo lugar en las proximidades de Granada y fue una más de las que tuvieron lugar en los años previos a la reconquista definitiva. Entre los muchos cronistas que lo refieren, he seleccionado a Alvar García de Santa María: «En este tiempo temió la tierra en el Real é mas en la cibdad de Granada, é mucho más en el Alhambra, donde derribó algunos pedazos de la cerca della».

El segundo fue comentado con sumo detalle por el investigador Cesar José Olivera Serrano¹¹ en su obra *La Acti-*

vidad Sísmica en el Reino de Granada (1487-1531). Estudios Históricos y Documentos (1995), refiriéndose a él como el terremoto que tuvo lugar en la costa del obispado de Málaga. De su relato extraemos un fragmento de la crónica que hizo a los Reyes Católicos el Secretario Real Hernando de Zafra: «De acá por agora non se ofresçe otra cosa a vuestras altesas escrevir, si non que esta çibdad e todo este Reyno está muy bueno y como a serviçio a vuestras altesas cumple. Y ha llovido muy bien y aunque el terremoto fizo algun daño en algunas partes es de dar muchas gracias a Nuestro Señor por que si fiera una hora mas tarde que la gente debiera pasar en Malaga, segund dken de mill personas (roto) dis que no peljgraron syno quatro, y en esta çibdad y en todas estas partes a Dios sean dadas muchas gracias aunque el temblor fue grande no ovo daño ninguno».

Contemporáneo del sabio padre Marina fue René Descartes (1596-1650), una de las mentes más preclaras del siglo XVII que tanto influyó en el pensamiento filosófico. Al parecer fue el primero en considerar a la Tierra como un astro frío en su superficie y envuelto por una corteza sólida, propugnando indirectamente una cierta fluidez del material interno, la cual sería admitida años después por Isaac Newton al calcular el aplastamiento polar del elipsoide terrestre en función de su velocidad de rotación. A partir de entonces asoció las dislocaciones corticales con el enfriamiento y

quiero agradecer la ayuda del que fue hace años responsable de los estudios sísmicos de dicho Instituto, don Alfonso López Arroyo, que dirigió otro proyecto de investigación similar a éste en el que también tomé parte. El ingeniero geógrafo Alfonso López Arroyo fue uno de los mejores sismólogos de su tiempo, junto a su gran amigo el jesuita Agustín Udías Vallina, Catedrático de Geofísica en la Universidad Complutense de Madrid. Por iniciativa de este último se preparó el homenaje académico, a título póstumo, plasmado en la publicación Alfonso López Arroyo: Pionero de la Sismología y la Ingeniería Sísmica en España. Física de la Tierra, vol. 24, 11-16. 2012.

⁶ El rey Juan III, ante el riesgo de que «le tomase la casa debajo, por muchos días fue forzado a alojarse en tiendas y pabellones en el campo».

⁷ El realizado por el ingeniero geógrafo José Galbis Rodríguez (1932-1940), que será referido de nuevo al final de este trabajo.

⁸ *Les catastrophes naturelles dans l'Europe médiévale et moderne.* (pp. 77-94). Presses universitaires du Midi. Toulouse, 1996.

⁹ Se refería a los dos ingenieros geógrafos Julio Mezcua Rodríguez y José Manuel Martínez Solares, quienes hicieron el estudio previo del Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a. C.-1900), publicado por el Instituto Geográfico Nacional en el año 2002.

¹⁰ Se estaba refiriendo al profesor de la Universidad de Granada Manuel Espinar Moreno, autor del artículo Los terremotos históricos de la provincia de Almería, incluido en la publicación Los estudios de sismicidad histórica en Andalucía (pp. 115-180). Almería. 1994.

¹¹ La honradez intelectual de este científico del CSIC queda de manifiesto en el capítulo de agradecimientos, cuando además de citar que su trabajo era el resultado de un Proyecto de Investigación financiado por el Instituto Geográfico Nacional en el año 1993, añadía: También

contracción de la masa que sustentaba a la bóveda terrestre. Puede resultar sorprendente que pensara Descartes en la existencia de canales subterráneos que comunicaban mares y tierras, a fin de organizar el amplio circuito de las aguas que impedía el desbordamiento del mar; una hipótesis sin el menor fundamento observacional, apoyada quizás en la doctrina aristotélica, pero con gran influencia y difusión por el merecido prestigio de que gozaba.

De análogo predicamento gozó la obra de otro sacerdote ilustre, el enciclopedista y jesuita alemán Athanasius Kircher (1601-1680), quien su celebrado *Mundus Subterraneus* (1664-1678) representó el interior de la Tierra; figurando en su tercera figura la leyenda «sistema teórico de los fuegos subterráneos, de los cuales, los volcanes son a manera de respiraderos». Durante su estancia en Italia percibió varios terremotos importantes, como el catastrófico de Calabria del 27 de marzo de 1638, aprovechando la ocasión para ascender al cráter del Vesubio¹² para es-

tudiarlo mejor; una experiencia que le valdría, por otra parte, para escribir el prólogo de la obra anterior.

Kircher matizó la explicación aristotélica del terremoto, achacando su causa al fuego central de la Tierra, añadiendo que la posible acumulación del aire caliente podría desencadenar sacudidas, más o menos violentas, cuya intensidad iría atenuándose con el tiempo. De esa forma, la acción del fuego subterráneo se convirtió en un elemento esencial para la interpretación del origen de los terremotos y de los volcanes¹³. En su peculiar concepción llegó a afirmar que la fuerza de las mareas hacía que el agua del mar subiera hasta las montañas, desde donde volvían al mar a través de los ríos. En todo caso ha de reconocerse su mérito, por atreverse a pensar en lo que podría ocurrir en el centro de la Tierra, así como por afirmar que esta se habría alterado con el tiempo, de ahí que en cierta medida deba de considerarse a Kircher precursor de la geología moderna.

En este mismo siglo XVII nació otro

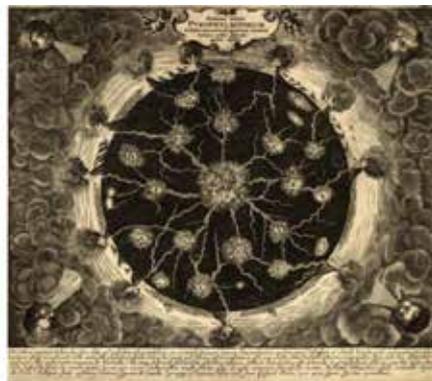
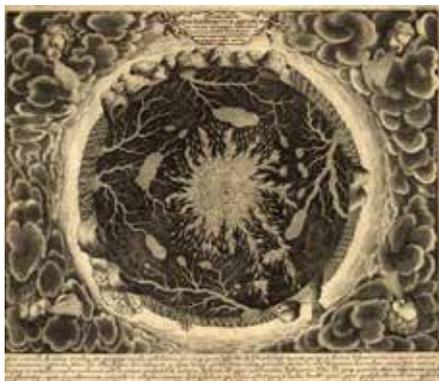
erudito español de primer orden, el monje beneditino Benito Jerónimo Feijóo y Montenegro (1676-1764), universalmente conocido por su obra monumental: *Teatro crítico universal* o *Discursos varios en todo género de materias para desengaño de errores comunes* (1726-1739), seguida por *Cartas eruditas y curiosas* en que, por la mayor parte, se continúa el designio del *Teatro crítico universal* (1742-1760). Fue en estas últimas, concretamente en las números 12, 13 y 14 del tomo V (1760), en las que se abordaron las cuestiones sismológicas relacionadas, de una u otra forma, con el terremoto de Lisboa (1755). Sus títulos fueron los siguientes: 12) Respóndese a cierto reparo, que un Médico docto propuso al Autor sobre la obligación que, en una Carta Moral, en asunto del Terremoto, intimó a todos los que ejercen la Medicina, de obedecer la Bula Supra Gregem Dominicum de S. Pío V; 13) Señales previas de Terremotos; 14) Crítica de la Disertación, en que un Filósofo extranjero designó la causa de los Terremotos, recurriendo al mismo principio, en que anteriormente la había constituido el Autor.

En la carta nº 13 se hacen una serie de consideraciones, algunas especialmente interesantes: «Hay quienes dan por preliminar del Terremoto la intumescencia del mar, y de los pozos, juntamente con una agitación de las aguas, semejante a la que tiene la agua hirviendo. Otros al contrario quieren, que la gran tranquilidad del mar, y silencio de todo viento, preceda siempre al Terremoto. Hay quienes proponen, como anuncio de él, la fuga de las aves, y de algunos animales terrestres de aquel sitio, a quien amenaza este daño... Hay asimismo quienes la Atmósfera muy turbada, y nebulosa, quieren sea preliminar del Terremoto; otros al contrario, la muy limpia, y despejada. De la Andalucía, donde fue considerable el estrago, vi dos relaciones enteramente uniformes, en que el fatal

¹² Así lo reflejaba el protagonista: Cuando alcancé el cráter, presencié un espectáculo horrendo: todo él estaba iluminado por el fuego y envuelto en un intolerable hedor de azufre y betún quemado. Atónito ante tan inusitado espectáculo, creía estar viendo el infierno, pues para serlo solo faltaban los demonios. Se oían los horrendos mugidos

y estrépitos del monte que creo son inexplicables, así como los humos mezclados a los globos de fuego que vomitaban continuamente once bocas abiertas tanto en el fondo como en los lados del monte.

¹³ El geocosmos de Athanasius Kircher. Leandro Sequeiros. LluL Vol 24. 2001 (pp 755-807)



Los conductos subterráneos y el fuego central en la obra de Athanasii Kircheri: *Mundus Subterraneus, quo unversae denique naturae divitiae* (1664-1678), la cual fue considerada en su momento como la mejor ilustrada del siglo XVII. En la imagen de la izquierda figuran los hidrofílicos, por donde circulaba el agua, y en la de la derecha los pirofílicos, por donde circulaba el fuego.

día primero de Noviembre¹⁴ estuvo muy claro, y sereno todo aquel Horizonte».

Es muy curioso que Feijóo señalase la existencia de señales premonitorias inciertas y seguras, refiriéndose en el punto 11 de esa misma carta al difícil asunto de la prevención sísmica: «porque vistas éstas, podría la gente salir de los techos, o a plazas anchurosas, o a los campos, y abrigarse en ellos con barracas, o chozas formadas prontamente de materiales tan leves, que su ruina no pudiese ocasionar daño considerable; pues aunque los despoblados no está fuera de todo riesgo, habiéndose visto tal vez abrirse la tierra en ellos, y tragarse cuanto encontraba en la superficie, como sucedió en el gran Terremoto próximo a un Aduar del Reino de Marruecos, donde se abrió un horrible bocarón, en que se sepultaron cinco mil habitantes del Aduar, y seis mil Soldados de Caballería, que se hallaban alojados en aquel sitio; pero todavía, como estos hiatos, o aberturas de la tierra, son sin comparación más raras, que los destrozos de los Edificios, todo hombre cuerdo debe, cuando hay amenaza de Terremoto, apelar de las poblaciones a los despoblados».

La última reseña, punto nº 16, enlaza con la doctrina aristotélica referida por Plinio en su Historia Natural y con las nuevas tesis de A. Kircher: «Ese grande trueno, que, como dije, indica haberse abierto la tierra en alguna parte, puede inspirar con bastante fundamento la favorable esperanza, si no de una total extinción del Terremoto, por lo menos de alguna aminoración de su rigor; por cuanto se debe concebir, que por aquel rompimiento se evaporase, si no toda, una parte de la causa. Y sin duda con esta mira dijo Plinio, lib. 2, cap. 82, que en los sitios donde hay muchas cuevas abiertas, tienen en ellas un remedio de

los Terremotos. Por lo que juzgo, que en los lugares más expuestos a este azote, cuales son los vecinos a cualquiera Volcán, convendría excavar algunas profundas zanjas, para dar por ellas respiradero, así a los fuegos subterráneos, como al aire violentamente dilatado, e impelido por ellos».

Es muy interesante el contenido de la carta nº 13, centrado en la discusión mantenida con el francés Isnard¹⁵ a propósito de la electricidad, como posible causa de los terremotos, sirva de botón de muestra lo dicho en el punto 18 de la misma: «De modo, que la virtud eléctrica justamente se puede considerar como un riquísimo gazofilacio de maravillas de la naturaleza, a cuyo fondo no sabemos cuándo se llegará; ¿y qué sabemos si se llegará jamás? Lo que hasta ahora se ha visto es, que según los varios instrumentos auxiliares, de que se ha usado, según las varias aplicaciones, y combinaciones de ellos, se fueron descubriendo nuevos fenómenos; o, por decirlo con expresión más adecuada, a cada nueva armadura de la máquina fue apareciendo algún nuevo prodigio. ¿Pues para qué ir no más que a tientas, a buscar otra causa de los Terremotos, cuando hallamos tantas señas de serlo ésta? Y en caso, que falte algo para asegurarnos, puede ser que eso poco, que nos falta, sea parte de lo mucho, que resta descubrir en ella misma. Hasta apurar esta mina, ¿para qué empeñarnos, no más que a Dios, y a ventura, explorar, rompiendo peñascos, las entrañas de otro cerro?».

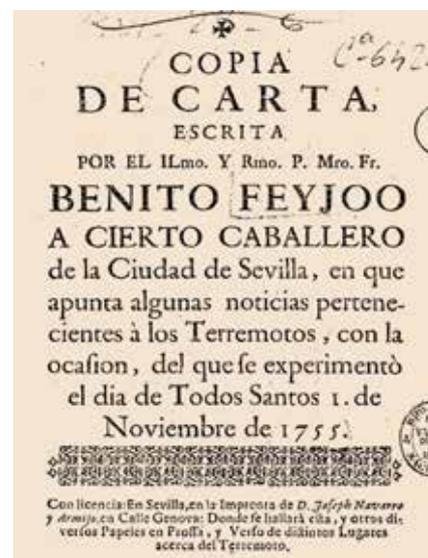
Feijóo escribió otras cartas a propósito del terremoto de Lisboa, el más estudiado en la historia de la sismología, similares a la que aquí se presenta. La carta, escrita el 19 de diciembre de 1755 en Oviedo, fue luego impresa en Sevi-

lla¹⁶ y la escribió para responder a otra que le había escrito un cierto caballero tres días después del terremoto. En ella se indicaba que el sismo había sido percibido en toda la península y también en Francia. Se subrayó en primer lugar que la gran extensión afectada es lo que hacía de él un fenómeno muy singular, pues no se tenían noticias de otro terremoto de similares características, «porque lo que refiere Platón de la Isla de Atlántida...que ocupaba todo el espacio, que hoy ocupa el Océano Atlántico, y un terremoto la sumergió toda, está comúnmente reputado por fábula egipciaca»¹⁷.

Igualmente expresaba su preocupación de que los terremotos de su siglo excedieran en su extensión a todos los pasados, ya que en tal supuesto el globo terráqueo se podría ir «minando más

¹⁶ No puedo dejar de citar el anuncio de otra publicación sobre el mismo asunto, que hizo el impresor al finalizar su carta, pues evidencia la secular creencia de que los terremotos eran un castigo divino: «...que España esté exenta de los estragos, que ocasionó el terremoto en otros reinos, principalmente por la tierra, y general devoción con que los españoles acostumbran a rezar la Santísima Corona, y Rosario a la Reina de los Ángeles...».

¹⁷ Algunas autoridades de la iglesia anglicana llegaron a sugerir que era reflejo del rechazo que sentía Dios hacia los portugueses, por ser papistas y devotos de la Virgen María.



¹⁴ Se refiere al día en que tuvo lugar el terremoto de Lisboa.

¹⁵ Había escrito en el año 1758 el libro siguiente: Mémoires sur les tremblements de terre.



Alegoría del Terremoto de Lisboa por João Glama Strobërle, en torno al año 1760. Obsérvense los ángeles con espadas, una metálica y otra de fuego, como si la catástrofe hubiese sido un castigo divino

y más cada día, hasta llegar a una portentosa calamidad» y habría que confiar en «la aplicación de la mano del artifice, para la conservación de nuestro orbe». Antes de rubricarla, retoma la cuestión de la electricidad como posible causa de los terremotos: «...si el terremoto de España se ha extendido a la Francia (mucho más si ha pasado más adelante) darán motivos a los Señores Filósofos Extranjeros, para atribuir los terremotos a un nuevo milagro de la virtud eléctrica, como ya generalmente recurren a ella, para explicar la causa de truenos y rayos; ... más todo ello es para reflexionado más despacio y no dictado tumultuariamente; pero en fin, si tuviere para divertir algo a V. md. Doy por bien empleado el tiempo, que gasté en este confuso rasgo de Física».

Las cartas sismológicas de Feijóo fueron recopiladas por Juan Luis Roche en el año 1756, en la obra titulada *Nuevo Systema sobre la causa physica de los terremotos: explicado por los phenomenos electricos y adaptado al que padeció España en primero de Noviembre del año antecedente de 1755*, encargándose el mismo de escribir un extenso prólogo apologetico.

Contrapunto de Feijóo fue su coe-

táneo Diego de Torres Villarroel (1694-1770), un personaje controvertido¹⁸ que

¹⁸ Sirvan de muestra dos ejemplos. Al comentar la obra de Isaac Newton aseguró que «una novedad tan espantosa y grande pasará con miserable crédito muchos siglos...sobre todo siendo parto de un intelecto de intención torcida que afectó la obscuridad en todas sus obras». Igual de contundente se mostró al referirse a la forma de la Tierra, oponiéndose a su carácter elipsoidal y mofándose de los que así lo entendían, llegando a asegurar que se trataba de una figura que había



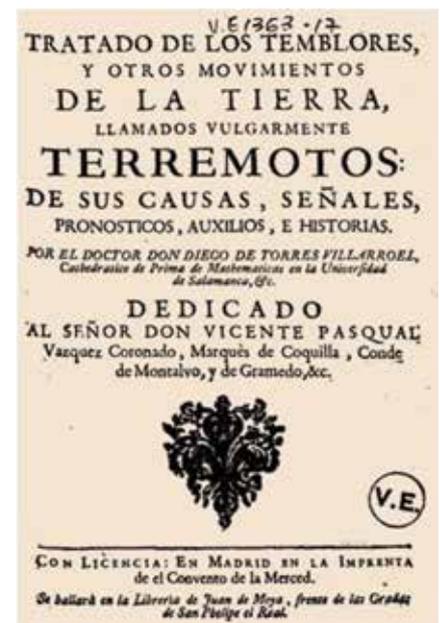
Portada de la obra de Roche que recopila algunas de las cartas sismológicas de Feijóo.

además de sacerdote llegó a ser Catedrático de Prima de Matemáticas en la Universidad de Salamanca, a pesar de que él mismo asegurase en su autobiografía que sus conocimientos sobre ese particular eran mínimos. También fue el autor del libro *Tratado de los temblores, y otros movimientos de la tierra, llamados vulgarmente terremotos, de sus causas, señales, pronósticos, auxilios, e historias* (1748). En su introducción¹⁹ explicaba el porqué de la obra: «...responder en cuatro o cinco pliegos de papel a más de cuarenta, que en figura de cartas me han venido de nuestros pueblos de la Andalucía, Murcia y Valencia, en las que me hacen (por curiosidad, por miedo, o por burlarse de mis ignorancias) varias preguntas hijas del susto, y la novedad del terrible terremoto, que padeció la Ciudad de San Felipe²⁰, y otros lugares de

sido generalmente despreciada.

¹⁹ AL VULGO, es prólogo con esparavanes de introducción, amenazas de Carta Misiva, y acometimiento.

²⁰ Ciudad de San Felipe Neri (Crevillente). El terremoto tuvo su epicentro en la población de Montesa y se produjo el día 23 de marzo de 1748 a las



Portada del libro escrito por Diego de Torres Villarroel.

aquellas costas la pasada primavera».

Tres fueron los apartados en que desarrolló su contenido, el primero lo dedicó al Mundo Subterráneo, el título del segundo fue De el origen, y causa de los temblores, pulsos, vibraciones, inclinaciones, y otros movimientos de la tierra, llamados vulgarmente TERREMOTOS, y del tiempo, y lugares, en que suelen ser más frecuentes. Finalmente, abordó el titulado De las señales, pronósticos de los terremotos, y Temblores de sus auxilios, y historias.

Su defensa de las tesis antiguas le hizo afirmar que los terremotos se debían al aire encerrado y oprimido en las entrañas de este mundo subterráneo (parafraseando a Kircher). Asegurando acto seguido que si los materiales encerrados y encendidos «son de espíritus más sosegados...se quedan estos terremotos en amagos». También condenó entonces a los filósofos que habían hecho divisiones metafísicas de los mismos «...que solo sirven de abultar el tratado... con que encaramar a la Ciencia de los delirios». Para él solamente había tres clases de terremotos, a las que llamó pulso, temblor e inclinación. «De modo que, cuando la tierra es golpeada, y movida por el aire encerrado en sus cavernas, o se hunde, o se levanta, o se queda parálitica, temblando por algún tiempo en uno, y otro lado; o se inclina a la derecha, o a la izquierda». El pulso lo definía apoyándose en la sístole y la diástole, asociadas al ritmo cardíaco, «esto es a brincos, entonces se hunde, o se levanta, y este movimiento se llama Pulso, cuando se aporrea hacia los lados, sin hacer rompimiento, ni cisura, se dice Temblor, y cuando se ladea a la izquierda, o derecha, se dice Inclinación». A su juicio, el pulso era el movimiento más pernicioso y el causante de ruinas, destrozos

6h 15m. Acto seguido se produjeron numerosas réplicas que culminaron con un nuevo temblor tan grande como el primero, el día 2 de abril.

y roturas, siendo el que abatía los edificios, montañas y demolía las ciudades y provincias. El temblor no tenía para él peligro alguno porque solo era un movimiento lateral sin rotura «con el que se mece y se cimbra la tierra». La inclinación era muy perniciosa, ya que era la causante de que los edificios perdieran el perpendicular, produciéndose entonces la caída y el estrago.

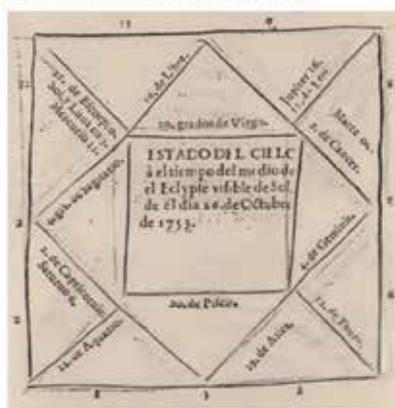
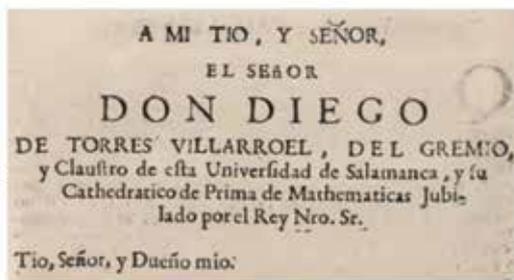
En el último apartado se menciona la necesidad de tener muy presentes los fenómenos premonitorios, ya que «aunque el estrago y el rompimiento parecen repentinos, no lo pueden ser, porque dura muchos días, y aún meses la generación...de dichas exhalaciones²¹». Después de confesar que él no había observado terremoto alguno por vivir en países de buena temperatura, llanos y de sólida superficie, detalló como los eclipses solares y lunares eran anuncios y señales de un futuro terremoto, «especialmente en aquellos lugares que por su disposición cavernosa, y nitrosa están expuestos a este achaque». Posteriormente entra de lleno en el campo astrológico, enumerando varios casos de terremotos históricos asociados a otras tantas constelaciones zodiacales. La última señal premonitoria que apuntó tuvo que ver con las aguas de los pozos y fuentes, cuyo cambio de sabor o de turbidez es el más claro síntoma de que va a producirse un terremoto. Los comentarios dedicados a la prevención no tienen desperdicio, he aquí la primera recomendación: «el único auxilio, y reparo contra los terremotos, y temblores es la fuga; porque no hay otro remedio para librarse de los estragos, que suelen producir en las poblaciones habitadas; y así cuando se vean las señales antece-

²¹ Antes se había referido a ellas de este modo: «...ya el rumor de las exhalaciones, que pelean por salir, y desencarcelarse de la estrechez de la caverna; ya la calentura del suelo que ha recibido por...boquerones muchos espíritus, vahos y humaradas».

dentos, deben huir los moradores a los desiertos sólidos, arenosos y llanos». En todo caso lo más interesante de este libro de Torres de Villarroel parece ser la referencia que hace al monje Johann Zhan (1631- 1707) de la orden premonstratense, puesto que al parecer fue el autor del libro Anatomía del Mundo²², en el cual se incluyó un listado con los terremotos habidos desde el año 20 o 22 de nuestra era hasta el 1694.

Sorprende que Torres de Villarroel no escribiese algún ensayo sobre el terremoto de Lisboa (1755), máxime cuando suele atribuírsele la predicción del mismo. Es posible que la explicación radique en que al año siguiente si lo hiciera, en Sevilla, su sobrino Isidoro Ortiz Gallardo de Villarroel, el cual le sucedió en la Cátedra de Salamanca. El opúsculo de veintiocho páginas fue dedicado a su tío con abundantes muestras de agradecimiento, siendo su título Lecciones entretenidas y curiosas physico- astrológico-meteorológicas sobre la generación, causas y señales de los terremotos y especialmente de las causas, señales y varios efectos del sucedido en España en el día primero de Noviembre del pasado de 1755. El texto es una especie de cuento sismológico en el que son protagonistas tanto el autor como dos de sus alumnos, habiéndose dividido en las cinco lecciones que se indican a continuación: I) Descripción del interior de la Tierra y circulación del agua; II) De el origen, generación y causas de los terremotos; III) Causas y generación del terremoto sucedido, casi en toda España, el día primero de Noviembre de este año de 1755 a las diez de la mañana; IV) Superior causa,

²² Quizás Torres Villarroel trató de simplificar el título *Specula physico-mathematico-historica notabilium ac mirabilium sciendorum, in qua mundi mirabilis oeconomia, nec non mirificè amplius, et magnificus ejusdem abditè reconditus, nunc autem ad lucem protractus, ac ad varias perfacili methodo acquirendas scientias in epitomen collectus thesaurus curiosis omnibus cosmosophis inspectandus proponitur ...1696.*



Portada del librito escrito dedicado a Diego de Torres Villarroel por su sobrino, junto a dos gráficos del estado del cielo en los años 1753 y 1755

tanto de la irregularidad pasada, cuanto del terremoto; V) Efectos y señales de los terremotos.

Las cartas sismológicas de Feijóo fueron referencia bibliográfica obligada en los años siguientes, buen ejemplo de ello fue el voluminoso dictamen escrito por Gutierre Joaquín Vaca de Guzmán y Manrique²³(1733-1804) en el año 1779, a instancias del Ayuntamiento de Granada. El título elegido fue del todo elocuente: Sobre la utilidad o inutilidad de la excavación del Pozo Airón, y nueva apertura de otros pozos, cuevas y zanjas para evitar los terremotos. Pretendía el Consistorio tratar de mitigar la zozobra

de la población, la cual recordaba todavía el gran terremoto de 1755, además de las frecuentes sacudidas que percibían con relativa frecuencia y sobre todo el pavor asociado al enjambre sísmico que acaba de sufrir durante los meses de junio, julio, agosto, octubre y noviembre de 1778. Tan novedoso informe lo encabezó un excelente resumen de ocho páginas, seguido por otras ochenta y seis en las que se desarrolló su contenido.

El texto es riguroso en su planteamiento, aunque parta de premisas propias de la época con raíces en la tradición milenaria que suponía el temblor de tierra como un castigo divino²⁴, así

²³ Alcalde del Crimen en Granada (juez integrado en la sala de la Audiencia y Chancillería) y Censor de la Sociedad Económica de Granada.

²⁴ El obispo de Guadix Miguel de San José escribió una carta a José Cevallos (4.IX.1756) en la que identificaba los terremotos como las adversi-

ha de entenderse sus reflexiones acerca de las aflicciones que padecemos «entre ellas las de los terremotos, pueden tener consideración a dos respectos, uno a la mano del Todo-Poderoso, que nos los envía para nuestro ejercicio y enmienda, y otro a los agentes naturales de que se vale para este efecto». Da cuenta en el mismo del pavor que sentían los granadinos, al suponer que los temblores eran castigo de sus culpas, y de sus continuadas visitas a los templos para invocar el nombre de Dios y pedirle misericordia por la mediación de sus patronos. No obstante, procuraron a la vez tratar de hallar los medios necesarios para que disminuyeran en la medida de lo posible. Así se explica la reiterada solicitud para que se excavase el Pozo Airón²⁵, ya que alguien debió recordar lo comentado a tal efecto en la Historia Natural de Plinio: a través de él se exhalarían los gases subterráneos, cuya acumulación era a la postre el origen de los terremotos.

El autor tuvo que esforzarse en desmontar con variados argumentos tan falsa creencia, debiendo superar para ello numerosas reticencias. Algunas de ellas amparadas por los escritos de autorida-

dades que padece el mundo y que son visitas y venganzas de Dios.

²⁵ El pozo había sido colmatado desde tiempo inmemorial, probablemente durante los años posteriores a la reconquista de la ciudad. Se localiza en las proximidades de la intersección de la calle Azacayas con la calle Elvira, justamente en la antigua Placeta de la Cuna (al final de la actual calle Postigo de la Cuna).



Estado actual de la boca del Pozo Airón.

des eclesiásticas tan señaladas como el agustino Fray Lorenzo de San Nicolás, en cuyo Libro de Arquitectura (1633) se podía leer lo siguiente: «para remediar ese daño hizo antiguamente la ciudad de Granada un pozo en la calle de Elvira de notable anchura y profundidad... que llamaban el Pozo-Airón, por donde expelían los vientos, sin que causasen temblores, el cual está hoy tapado, y los ancianos que habitan aquella ciudad afirman con relación, no haber habido temblores mientras duró el estar abierto; daño que han experimentado después de cerrado». A fin de rebatir tales afirmaciones, el redactor del informe recurrió en repetidas ocasiones al sarcasmo, presentando el interés añadido de dar cuenta de sismos históricos relevantes, que a tenor de lo defendido por el fraile se debieron producir estando el pozo cerrado. He aquí algunos de ellos: el que tuvo lugar a comienzos del mes de julio del año 1431, que derribó algunos paños de la muralla de la Alhambra, o el violentísimo del día 4 de julio del año 1526.

Análogas críticas le merecieron la aseveración del también eclesiástico e historiador Francisco Bermudez de Pedraza, firme defensor de la doctrina aristotélica sobre ese particular, el cual refería en su Historia Eclesiástica de la gran ciudad de Granada (Capítulo 48 de la IV parte) que «los Moros como Filósofos tenían en la calle de Elvira un Pozoairón... que servía para este efecto²⁶, y lo cegó nuestro mal gobierno». El juicio sobre el gobierno fue desmontado inmisericordemente por Vaca de Guzmán, valiéndose para ello de los sismos previos; estas fueron sus palabras: «Ahora bien, o éstos temblores acaecieron estando cegado el Pozo-Airón, y en tal caso no fue nuestro mal gobierno el que lo cegó, como afirma el Seños Pedraza, o el tal pozo es-

taba abierto, y entonces se echa de ver, que o los Moros formaron muy mal las ideas filosóficas, que sobre este punto le atribuye el autor, pues costearon para remediar los terremotos una obra inútil a tal efecto; o lo que es más cierto, construyeron este pozo con otro objeto muy distinto, del que creyó el vulgo».

Con semejante afirmación Vaca de Guzmán ya estaba anunciando su conclusión acerca de la polémica sobre el Pozo Airón, puesto que a su juicio el llamado pozo fue en realidad un aljibe, de manera que de acuerdo con ello recomendó que continuase taponado y que no se abrieran otros con fines sismológicos; tanto por las dificultades de alcanzar las profundidades necesarias como por el desembolso tan grande como inútil que habría que efectuar. Fue especialmente interesante la digresión que hizo a propósito de la gran profundidad que deberían tener tales perforaciones para llegar a conectarlas con las cavidades subterráneas en donde se acumularían los gases que tendrían que salir hacia la superficie. Mención aparte merece su recordatorio de los grandes matemáticos que habían medido el radio de la Tierra, una prueba evidente de su erudición. En cualquier caso, lo más relevante de este dictamen desde el punto de vista sismológico fue la detallada relación que se hizo del gran número de terremotos acaecidos en la segunda mitad del año 1878 y que se reproduce tras estas líneas.

Los sismos comenzaron el 5 de junio, para seguir los días 5, 23 y 24 de julio; el 3 y el 8 de agosto; el 7 y el 11 de octubre, para culminar con el movimiento que tuvo lugar a las 8h 40m del día 11 de noviembre, notándose un movimiento con una inclinación norte sur que duró entre 5s y 6s; añadiendo que «en este breve tiempo hicieron mucho sentimiento diversas obras, y rodaron remates de otras». Las sacudidas continuaron en los días siguientes, de hecho en la página VII del dictamen figura una nota de pie que



conviene reproducir en su integridad: «En el mismo día 13 a las 9 y 11 y cuarto de su mañana, y a las 2 y 40 minutos de la tarde se dejó sentir notablemente aunque más mitigada su violencia: repitió en la mañana del siguiente 14 a las 3 menos cuarto, 3 y cuarto, 7 y media, y dos veces con muy corto intermedio a las 11 y cuarto, y por la noche a las 9 y a las 12. En la mañana del día 15 se experimentó a la 1, a las 5, y a las 7 y cuarto, y por último el día 18 a las 3 y media y 4 de la tarde. Algunas de estas sensaciones fueron sin duda con movimiento de pulso; pero en otras, en que dio lugar para la observación su duración momentánea por más perceptible, se conoció bastante inclinación de levante a poniente».

El comprensible temor de la población ante el enjambre sísmico fue relatado con todo detalle por el autor del informe, mencionando las procesiones a los templos y la repetición del sagrado himno Santo Dios, Santo fuerte, Santo inmortal, ten misericordia de nosotros, con la intención de desarmar el airado brazo del Todo poderoso. Se añade después una curiosa nota relativa a unos grandes terremotos que asolaron

Constantinopla, durante los cuales fue «arrebato un niño por los aires, volvió instruido milagrosamente, diciendo haber oído a los Ángeles este himno; el que aprendido y debidamente repeti-

²⁶ Se estaba refiriendo a la eliminación de los terremotos.



Sestercio, con la imagen del emperador Tiberio, acuñado para recordar la reconstrucción de las ciudades destruidas por el terremoto del año 19.

do por el Pueblo, fue bastante para hacerlos cesar. Los emperadores Teodosio el menor y Pulqueria mandaron se cantase por todo su Imperio. Hallase confirmado en el Concilio Calcedonense».

Se cierra este siglo XVIII con una amplia reseña sobre la contribución sismológica de Benito Bails (1730-1797), un ilustrado nacido en Cataluña, formado en Francia y afincado en Madrid desde el año 1761 hasta el final de sus días, allí llegó a ser Director de Matemáticas en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. Tales aportaciones sísmicas fueron incluidas en su obra: *Tratado de la Conservación de la Salud de los Pueblos y consideraciones sobre los Terremotos*, con la noticia de los más considerables de que hacen mención las Historias; y del último que se sintió en Europa el día primero de Noviembre de 1755²⁷. A todo lo largo del texto se comprueba cómo se respetó la doctrina tradicional imperan-

te en aquella época, creyendo que los sismos eran fenómenos meteorológicos, cuyo origen podía explicarse a la luz del estudio del aire.

De acuerdo con ella consideraba el autor que casi resultaba innecesario abundar en una cuestión ya resuelta, hasta el extremo de que «muchos tendrían por curiosidad impertinente, o trabajo superfluo el tratar ahora de los terremotos, después de que los mayores ingenios, así de la docta antigüedad, como de los tiempos modernos, han escrito tanto sobre este asunto, que ya no hay lugar a mayores indagaciones, quedando ceñido todo lo que acerca de él se puede decir a copiar lo que se lee en Aristóteles, Séneca, Plinio, en las *Transacciones Filosóficas*, y en las *Memorias de la Real Academia de Ciencias de París*²⁸». No obstante, a esas alturas del siglo aún se mantenía el carácter mitológico de los terremotos, a tenor de lo escrito en la página 330 del libro: «No hay a buen seguro hombre ninguno, como no sea al-

gún impío, que sea osado negar que los terremotos son instrumentos de que se ha valido la Divina Omnipotencia para castigo de los hombres; pero tampoco habrá ninguno tan temerario que afirme que todos han sucedido con este fin». Inmediatamente después se aseguraba que si se conociesen las causas reales que los producían, como sucedía con los vientos y otros fenómenos meteorológicos, «acaso no graduaríamos estos ruidosos movimientos de la naturaleza de castigo del cielo, ni fundaríamos en ellos los pronósticos de nuestra total ruina».

Aunque el autor indicase que no era su intención escribir la historia de los terremotos, lo cierto es que hizo una crónica especialmente valiosa de los más importantes que se produjeron durante el imperio romano. Reputados cronistas como Tácito, Estrabón, Séneca o Plinio, refirieron el gran terremoto nocturno del año 19 de nuestra era, el cual destruyó doce ciudades de Asia. La descripción del fenómeno así lo atestigua, la tierra se abrió en muchos lugares «y en estos precipicios hallaban su mayor ruina. Muchas montañas nacieron de los abismos: muchos valles y llanuras se transformaron en empinadas sierras, y por entre estas horrorosas mudanzas de la tierra se vieron salir consumidoras llamas». Tácito comentó como, ante tamaña desolación²⁹, «el duro y cruel corazón de Tiberio se ablandó y volvió tan piadoso, que no solo dispensó a las ciudades el pagar tributos los cinco años inmediatos, sino que también las mandó repartir crecidas sumas para resarcir las pérdidas y redificar las casas».

Más señalado todavía fue el que tuvo lugar en Antioquía, casi 100 años después, ya que estuvo a punto de costarle

²⁷ Bails reconoce en el prólogo que su trabajo era la traducción de una obra portuguesa atribuida al prestigioso médico Antonio Ribeiro Sánchez, el cual estudió y se graduó en la Universidad de Salamanca. Muy pronto se trasladó a Rusia y fue nombrado primer médico de la zarina. Más adelante se estableció en París, en donde vivía de la pensión que recibía de la corte de San Petersburgo. El propio médico le envió a Bails información adicional para completar la traducción que estaba efectuando.

²⁸ En el año 1700, el químico francés Nicolas Lémery presentó en ella la memoria: *Explication physique et chymique des Feux souterrains, des Tremblements de Terre, des Ourangans, des Eclairs et du Tonnerre*. En ella defendió que algunas reacciones químicas del interior de la Tierra liberaban energía en forma de calor, hasta el punto de poder producir explosiones subterráneas que darían lugar a terremotos.

²⁹ Bails añadía que aún se conservaba la memoria de aquel terremoto, gracias a la acuñación del sestercio con la siguiente leyenda *Civitatus Asiae Restitutis*, con la que se pretendió recordar la reconstrucción de tales ciudades.



Trabajo inédito (359 pp.), del que se han extraído estas notas sísmicas.

la vida al emperador Trajano y a su sucesor Adriano. El sismo se produjo el día 3 de diciembre del año 115, siendo precedido por «vientos furiosos, espantosos truenos, con ruidos debajo de tierra: las casas y torres empezaron dando vaivenes del mismo modo que los navíos dan balances en medio de una mar tempestuosa...y estos movimientos de la tierra duraron muchos días con muy poca interrupción³⁰. El mismo Trajano... pudo apenas escapar del riesgo saltando por la ventana de su cuarto». El siguiente episodio referido fue el del año 262, bajo el consulado de Galieno y Faustino, «el terremoto más universal de los que refieren las historias. Empezó en Asia, extendiéndose por toda la costa del Mediterráneo; muchas ciudades de estos continentes desaparecieron, quedando sepultadas en las aberturas de la tierra, y apareciendo en su lugar lagunas de agua salada. Al mismo tiempo padecía la

³⁰ Dion Casio Coceyano manifestaba en el libro XVI-II de su Historia Romana «que el monte Lison junto a Antioquia se inclinó de tal manera que parecía iba a arrastrar a la ciudad, que otras montañas se cayeron, que aparecieron nuevos ríos, secándose y desapareciendo otros muy caudalosos»

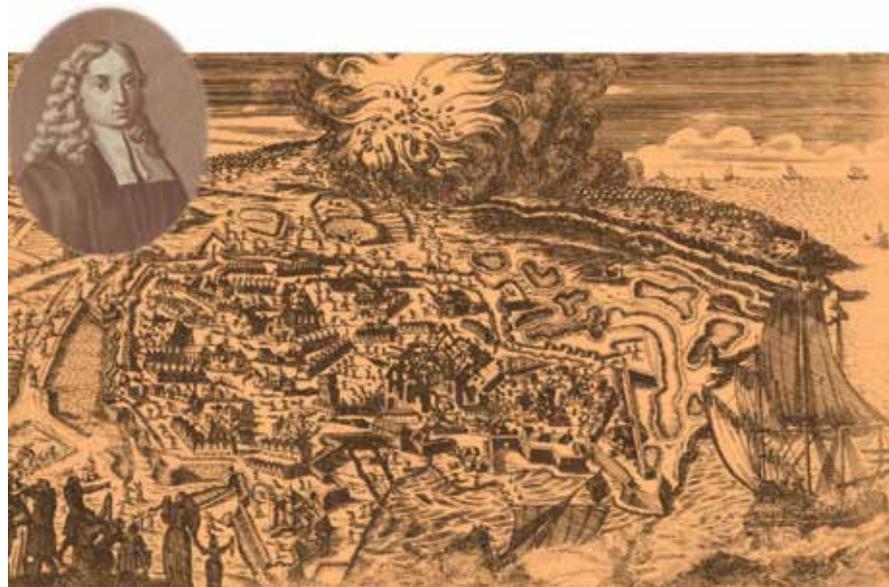
ciudad de Roma y toda Grecia una cruel peste, con tanta mortandad que algunos días morían como mil personas». La crónica latina formó parte de la obra in Vita Gallieni, debida a Trebellius Pollio.

El primer terremoto del siglo siguiente, en ser comentado, fue el que tuvo lugar el 21 de agosto del año 358, siendo Constancio el emperador. Cincuenta ciudades de Asia, Natolia y Macedonia fueron totalmente colapsadas, causando gran sensación la de Nicomedia³¹, considerada por entonces como una de las más florecientes del mundo, debido al fuego posterior que completó la catástrofe. El historiador Amiano Marcelino aseguraba que ese día empezó a oscurecerse el cielo, hasta el extremo de ocultar el Sol. Al mismo tiempo se desató un vendaval y «los estruendos subterráneos eran tan profundos, que los vecinos...no se conocían unos a otros. Poco después de esta universal confusión empezaron las sacudidas de tierra...parte de ella se

fue a los abismos que se abrieron y parte apareció cubierta de montañas, que salieron del profundo de sus entrañas. A pesar de tanta revolución hubieran salvado sus vidas muchos vecinos, si las llamas que la tierra arrojó no los hubieran totalmente consumido».

Especialmente violento debió ser también el temblor de tierra que afectó a todo el imperio romano el 19 de julio del año 365, durante el mandato del emperador Valente. Bails escribió que el mar Mediterráneo se alteró de tal modo «que los pescados y los monstruos marinos se quedaron en seco, su reflujo arrojó con igual violencia barcas y navíos a los montes, donde se hicieron mil pedazos». Igualmente recordaba que San Jerónimo, al contar la vida de San Hilarión, comentó el maremoto en parecidos términos «salieron los mares de sus límites con tal ímpetu, que parecía que Dios quisiese acabar el mundo con otro diluvio, o restituirle a su primer caos». Otro terremoto memorable sacudió Roma y Constantinopla en el año 558, siendo

³¹ La actual ciudad turca de Izmit. La ciudad primitiva fue destruida por Lisimaco, general de Alejandro Magno, y reconstruida por Nicomedes I en el año 264 a.C., de ahí su anterior nombre.



Grabado del terremoto de Catania (1693) en el Archivo de Simancas. Se ha superpuesto un retrato de Domenico Bettone, célebre médico que lo describió.

emperador Justiniano el Grande³². Como en el caso anterior se produjo un fuerte maremoto que inundó más de tres leguas de tierra. Sus efectos no solo se dejaron sentir en ambas ciudades, pues comentaba Bails que toda Italia padeció infinito. Los terremotos principales ocurrieron durante los meses de junio y julio, aunque en el de noviembre volvieron a producirse, «quedando entre todas las ciudades y pueblos que los padecieron más maltratada Constantinopla que otra ninguna. Como principiaron de noche con vientos tan impetuosos, que parecía despedazarse el firmamento con horrosas nieblas meonas, frío y nieve, no les quedaba a aquellos infelices más remedio, ni más consuelo que acabar en breve su vida».

Casi 150 años después, en 742, sufrieron varios terremotos en Siria, Palestina, Sicilia, Calabria y Grecia. Las calamidades padecidas fueron tantas que el emperador Constantino IV decidió repartir el botín de sus victorias frente a los sarracenos «porque Constantinopla y las principales ciudades del Imperio Romano llegaron a los últimos de su ruina. Desde el mes de agosto hasta principios de octubre, nadie distinguía el día de la noche, porque una nube espesísima quitaba la luz». Ribeiro apuntaba por otro lado, que de ser cierta la crónica de Nicéforo, muchas ciudades de Siria y Palestina fueron sepultadas en los abismos «y lo que causa admiración es que algunas fueron trasladadas a otro sitio seis millas, u dos leguas lejos del primero sin daño ni ruina considerable de los reinos». Tanto el autor como el traductor fueron reacios a continuar con la relación pormenorizada de grandes terremotos históricos en sus breves apuntes sismológicos, si bien remitían a la celebrada historia natural de Georges Louis Leclerc, conde Buffon, para que los lec-

³² Flavius Petrus Sabbatius.

tores interesados pudiesen satisfacer su curiosidad. A pesar de ello se culminó esta crónica con el famoso sismo, acompañado de maremoto, que asoló la ciudad siciliana de Catania el 17 de enero de 1693; estimando que solo salvaron su vida 914 personas, es decir el 20% de su población³³.

El relato de lo sucedido, extraído del que efectuó Antonio Serrovita, causa todavía cierto espanto. Contaba ese clérigo que cuando se iba aproximando a la ciudad, el día antes, empezó a distinguir una nube densa y oscura que cubría toda ella. De repente comenzaron a salir llamas del Mongibello³⁴, a la vez que las olas del mar eran tan altas que parecían llegar a las nubes. Tal era su estruendo, que «toda la artillería del mundo no era capaz de igualarle: las aves huían espantadas...el caballo en que iba montado aquel religioso, y los de sus dos compañeros se pararon de repente temblando. En aquel momento se levantó la tierra dos palmos, y así que el Padre volvió los ojos hacia Catanea, no vio más que una negra y espesa nube de humo y polvo, que cubría el sitio donde estaba la ciudad, la cual fue sumergida en aquel instante³⁵».

Es muy probable que la inclusión del anterior listado, con algunos de los temblores históricos más notables, fuese una de las muchas consecuencias que trajo consigo el gran terremoto de Lisboa, el cual conmocionó profundamente

³³ Estimada por aquel entonces en 18014 habitantes.

³⁴ Aún se denomina así a la montaña en la que se encuentra el cono del volcán Etna.

³⁵ La primera descripción de este gran sismo fue realizada por el médico italiano Domenico Bottoni, el cual escribió, en ese mismo año de 1693, el manuscrito *Idea histórico-physisca de magno Trinacriae terraemotu*. En él se apoyó para publicar *De Immani Trinacriae Terremotu* (1718), trabajo incluido en las *Philosophical Transactions* de la Royal Society, institución a la que pertenecía desde el año 1697; en él se apoyó el autor portugués para hacer su reseña de este terremoto.

a la sociedad ilustrada de su tiempo³⁶. De nuevo se apoyó Bails en Ribeiro para referirse con cierto detalle al citado sismo. Noticia del terremoto que empezó a sentirse en Europa, África y América, desde el día 1 de Noviembre de 1755. Así tradujo nuestro protagonista el epígrafe con que inició su crónica del temblor de Lisboa el autor luso Ribeiro Sánchez, aunque en realidad incluyese en ella otros asuntos igualmente relacionados con la sismología: geografía sísmica, construcción antisísmica y prevención. La importancia de este documento radica principalmente en que se redactó cuando solo habían transcurrido poco más de dos meses y medio de tan terrible suceso, el propio autor lo certificó indirectamente con estas palabras: «Mi empeño no es dar una historia puntual del terremoto que principió el día 1 de Noviembre del año pasado,..., no solo porque me faltan relaciones circunstanciadas formadas por personas inteligentes, sino también porque estoy formando esta relación, o noticia a 19 de Enero de 1756, a cuyo tiempo parece que dura todavía».

Indudablemente, el gran terremoto de Lisboa fue uno de los sismos catastróficos que mereció la mayor atención del mundo ilustrado³⁷, suscitándose un

³⁶ El terremoto de Lisboa fue ciertamente el desencadenante de una serie de estudios con los que se inició realmente la sismología moderna, uno de los pioneros fue el astrónomo inglés John Bevis, el cual publicó en el año 1757 el libro *The History and Philosophy of Earthquakes in which he collected accounts of the Lisbon earthquake from diverse authentic sources*. Su trabajo fue continuado por otro astrónomo y geólogo inglés, John Michell, quien en el año 1761 escribió (tras ser elegido miembro de la Royal Society) la obra *Conjectures Concerning the Cause, and Observations upon the Phænomena of Earthquakes*, presentando en ella sus conclusiones acerca del desastroso terremoto de Lisboa. En ella demostró que su foco se debía localizar bajo el fondo del Océano Atlántico, aunque propusiera luego que el sismo debió ser debido al vapor, a alta presión, creado cuando el agua entrase en contacto con los fuegos subterráneos. A pesar de ello se le reconoce con razón como uno de los padres de la sismología.

³⁷ El médico portugués creía que había sido

interesante debate sobre el posible antagonismo entre la infinita bondad divina y la ocurrencia de eventos naturales extraordinarios que ocasionan miles de víctimas³⁸. De entre todas las controversias surgidas, merece ser recordada la protagonizada por François Marie Arouet (Voltaire) y Jean Jacques Rousseau, haciéndose el primero de ellos la siguiente pregunta ¿Más como concebir un Dios, la bondad misma, que prodigó sus bienes a los hijos que ama, y derramó sobre ellos el mal a manos llenas³⁹? A pesar de los muchos años transcurridos, aún sobrecoge la lectura de la descripción efectuada en esta obra de Bails: «el día 1 de Noviembre de 1755, entre nueve y diez de la mañana, estando el cielo claro y sereno, y la atmósfera más caliente de lo que correspondía a la estación, empezó el terremoto de Lisboa, con tanta violencia, que en siete minutos derribó, o abatió la mayor parte de los majestuosos edificios que eran el ornamento de aquella capital. Por ser el día de Todos los Santos, la mayor parte de sus vecinos estaban en las Iglesias, que padecieron más que los otros edificios, quedando con esta ocasión sepultadas muchísimas personas de ambos sexos. Además de la pérdida de tantas vidas, causada por la ruina de las casas, la de los bienes fue inmensa; porque fuese por casualidad, u obra de algún malvado, a eso de las doce del día apareció toda la ciudad en llamas, cuya violencia duró cuatro días.

«uno de los más universales terremotos que las generaciones venideras leerán en sus historias». Este sismo fue desde luego el primero que se estudió desde un punto de vista exclusivamente científico, de ahí que a partir de ello se iniciase el verdadero desarrollo de la sismología moderna.

³⁸ El mismo autor refería que la mayoría de las víctimas se encontraban oyendo misa, por ser la fiesta de todos los santos.

³⁹ La pregunta la incluyó, el genial enciclopedista en su celebrado: *Poème sur la destruction de Lisbonne ou examen de cet axiome, Tout est bien.* (1756), el cual solo es un exponente más de como resultaron sacudidas muchas conciencias de la época.

Las aguas del Tajo que bañan la ciudad, se retiraron de la playa con ímpetu, y como en la parte más angosta tiene allí su madre una legua de ancho, al volver las aguas se echaron con tal violencia en la parte baja de la ciudad, que lo anegaron y destruyeron todo hasta donde llegaron. Hasta las diez de la noche se sintieron sacudidas en la Tierra, bien que menos violentas, habiéndose retirado ya todas las personas al campo, donde muchas viven todavía».

Por supuesto que el temblor fue percibido en toda la Península Ibérica⁴⁰, resultando especialmente afectadas iglesias y monumentos de diferentes localidades; más singulares fueron sus efectos colaterales en puntos tan alejados como las costas irlandesas o los lagos escandinavos, clara evidencia del carácter global de este tipo de fenómenos geológicos. En la obra se da buena cuenta de lo ocurrido en Setubal, donde además de notarse con especial inten-

sidad sufrieron un gran maremoto: «el mar se retiró rapidísimamente de la playa, adonde habían ido a buscar amparo los vecinos atribulados con tan extraño suceso⁴¹: volvió después el mar con portentosa velocidad, y anegó y cegó aquello riquísimo Puerto con los habitantes que se habían refugiado en la playa, no habiendo edificio alguno, ni público, ni privado, que resistiese a tan extraordinario ímpetu». Asimismo refirió otras poblaciones, especialmente de Andalucía occidental, concretando que en Sevilla «hizo bastante estrago en los edificios más considerables y mató algunas personas»; también mencionó el maremoto que asoló las costas atlánticas de la región: «en muchos lugares de aquella costa quedaron sepultados muchos vivientes debajo de las olas del mar agitado con violencia». Bails comentó igualmente que en otras ciudades españolas, como Granada⁴² y Alicante «se sintió el

⁴⁰ Los efectos del terremoto en España fueron estudiados por el ingeniero geógrafo José Manuel Martínez Solares, en una cuidadosa y completa Monografía del Instituto Geográfico Nacional, publicada en el año 2001: *Los efectos en España del Terremoto de Lisboa: 1 de noviembre de 1755.*

⁴¹ Repentinamente surgieron por la ciudad «chorros de agua de extraordinaria corpulencia, tan horrendos y con tal furia, que le inundó a la altura de muchas varas».

⁴² En mi condición de granadino no puedo dejar de mencionar que en la Biblioteca Nacional de España se conserva un valioso documento, proba-



Uno de los muchos grabados del terremoto de Lisboa, realizado en Alemania en torno al año 1887

mismo terremoto el mismo día y hora».

El terremoto también se dejó sentir, con especial virulencia, en las ciudades del Norte de África. Aunque Ceuta, Tánger y Tetuán resultaran seriamente afectadas, la más perjudicada fue sin duda Mequínez; tal como lo dejó dicho Bails: «allí perecieron a la misma hora muchísimas personas, junto a la ciudad se abrió la tierra en trecho tan largo, que quedaron enterradas diez mil almas con muchos caballos y camellos, acompañando tanta destrucción ruidos horrendos en lo interior de la Tierra». A los comentarios anteriores se sumaron los que indicaron los acontecimientos extraordinarios observados en las costas bálticas de Alemania y Polonia, así como en lagos

blemente redactado por un sacerdote, en el que se detallan los desperfectos sufridos por algunas de las iglesias de la ciudad. El documento fue publicado en Sevilla, en el mismo año, por la imprenta de José Navarro y Armijo, con el siguiente título: Relación de lo acaecido en la ciudad de Granada el día 1 de noviembre de 1755, con el terremoto, que principió entre 9 y 10 de la mañana y duró diez minutos. El texto comienza con la Catedral «que siendo una obra tan fuerte quebrantó cuatro naves», de la que salieron despavoridos feligreses y «hasta los sacerdotes que estaban celebrando misa». En San Antón se torció el capitel de su torre «de tal suerte que se necesita derribarlo, antes que se venga al suelo y haga mayor daño». En el Convento de Carmelitas calzados «sucedió lo propio» y uno de los muchos yesones que cayeron «rompió un brazo a un muchacho». Acto seguido se refiere a la Colegiata de San Salvador con estas palabras «ha sido preciso sacar el SSmo. SACRAMENTO, y depositarlo en las Monjas Agustinas, en donde celebran, y rezan las Horas Canónicas, pues dicha colegiata ha quedado incapaz de servir, y está amenazando ruina». «La media naranja de San Jerónimo se quebrantó toda, y habiendo caído un pedazo de ella, maltrató malamente a un hombre». «El colegio de Santa Catarina, siendo una Obra muy fuerte, y nueva, ha quedado todo quebrantado». «En el Monasterio de San Basilio, y Convento de la Santísima Trinidad, los Sacerdotes, que estaban celebrando, dejaron los Altares, y salieron revestidos huyendo a la calle; las Gentes en ellas se caían, como embriagados, unos huían sin saber a dónde, y otros quedaban pidiendo a Dios misericordia a voces; y en fin, el conflicto ha sido general, y quedan todos atemorizados, y de donde más huyen es de las iglesias». El final de la crónica es curioso, sorprendente y hasta milagroso «... y en la procesión que se hizo en Granada de Acción de Gracias, se desprendió el badajo de la Torre de N. Sra. De las Angustias, y dándole a un eclesiástico lo dejó sin lesión».



Modelo de Gaiola pombalina (Jaula pombalina), una estructura arquitectónica de madera resistente a los terremotos, desarrollada en Portugal en el siglo XVIII para la reconstrucción del centro pombalino de Lisboa, tras el devastador terremoto de Lisboa de 1755.

suecos y finlandeses. Esta fue la referencia expresa a tales fenómenos:

«En la provincia de Dalecarlia las aguas de las lagunas Frisem, y Stooraled empezaron a agitarse, inundando las orillas y bajándose la tierra todo alrededor, lo que aumentó la inundación. En Pomerania, las lagunas de Netzo, Mukhagast, Reddelin, Libesé, distantes doce leguas de Berlín, y treinta del mar Báltico, salieron de madre con espantoso ruido entre once y doce de la mañana, inundando los campos de alrededor, restituyéndose al cabo de seis horas, con flujos y reflujos a sus antiguos límites». Después de mencionar una serie de terremotos ocurridos en diferentes latitudes, durante Noviembre y Diciembre, posibles réplicas del sismo principal, se recoge en esta crónica otra información sísmica relevante, acerca de este: «los navíos que navegaban en el Océano 50 leguas lejos de Cádiz y 150 de Lisboa, experimentaron con la extraordinaria agitación del mar los efectos del terremoto del día primero de Noviembre».

Las penalidades sufridas por la ciudad de Lisboa continuaron durante todo el año 1755, ya que hasta el 22 de diciembre no cesaron los terremotos, «bien que no han sido tan violentos como los primeros que se sintieron, pagando con tan triste distinción la preeminencia que tenía de ser la más ilustre de cuantas ciudades han padecido el terremoto». Hoy día, se admite que el gran temblor de tierra, que asoló la capital portuguesa en ese año, fue un sismo múltiple, siendo las coordenadas geográficas del epicentro las siguientes: latitud 36º 30' N. y longitud 10º 00' W.G.; es decir una zona situada en el Océano Atlántico y al SW del cabo de San Vicente. La profundidad del foco se estima entre los 20 y 40 km. El temblor se produjo a las 10h 16m (TU), tuvo una duración próxima a los diez minutos y una magnitud mayor que 7 y menor que 8 en la escala de Richter; se cree que se liberó una energía aproximada de 2.9 E17 julios, es decir equivalente a más de quinientas bombas análogas a las de Hiroshima y Nagasaki.

Estos breves apuntes sismológicos de Benito Bails incluyeron, tras la descripción del terremoto anterior, una serie de reflexiones que parece oportuno reproducir a pesar de que las tres primeras parezcan en la actualidad un tanto gratuitas. Efectivamente, de acuerdo con la poca información de que se disponía en su tiempo, se aseguraba que los sismos «siempre han sido más terribles y frecuentes en los países que están entre los 45 grados de latitud boreal y meridional». En segundo lugar se refería a la composición del subsuelo, señalando que «en las tierras que se componen de canteras, mármol, que están cubiertas de peñas, roquedos, o sierras; las que abundan de metales...son las más expuestas a los terremotos». La tercera repite la explicación meteorológica de estos fenómenos: «parece que todo aquello que impide la transpiración de los vapores y exhalaciones que se forman en lo interior de la Tierra contribuye a causar terremotos. Se tiene observado que luego o poco después de grandes secas, continuadas lluvias, de fríos excesivos y largos, se experimentan temblores de tierra en las regiones meridionales».

Las siguientes reflexiones son recomendaciones urbanísticas en las que se establecieron ciertas medidas de prevención, tratando de mitigar los efectos de los sismos y muy especialmente los de los maremotos: «parece que siempre que se hubiese de fundar alguna ciudad en comarca expuesta a los terremotos, debería escoger el Gobierno el terreno más ligero, más esponjoso, arenoso...donde se crían árboles, plantándolos en todas las plazas, prados y paseos, después de fundada la población⁴³». Sin embargo, no parecía estar muy convencido de su

⁴³ Bails detallaba inclusive que los árboles deberían ser pinos o álamos, pues ambos «sirven para chupar como otras tantas esponjas, los vapores y las exhalaciones, conforme se ha dicho en el tratado antecedente».

eficacia, cuando afirmaba acto seguido «no aseguramos que estas precauciones bastasen a impedir los terremotos, pero es cierto que se experimentarán menos violentos, y con menos frecuencia». Bails recurrió a las enseñanzas de Platón⁴⁴ para aplicarlas al caso de los maremotos, pues según aquel no debería edificarse ciudad alguna muy cerca del mar, «habiendo de estar a lo menos cuatro leguas lejos...lo mismo de fundar ciudades cerca de los ríos caudalosos, bien que no es necesario plantarlas a tanta distancia de las corrientes».

Con la última reflexión se aproximaba también el autor a la planificación urbana y a la normativa sismo resistente, en regiones proclives a la ocurrencia de terremotos: «lo que pide particular cuidado en semejantes parajes es el modo de fabricar las casas, el multiplicar las pla-

⁴⁴ Aunque se le atribuya a Platón (Pseudo-Plutarch: Placita Philosophorum) la afirmación de que había seis tipos de movimientos: de arriba hacia abajo, de derecha a izquierda, y de atrás hacia delante, no parece muy fiable. La justificación podría ser que Aristóteles no comentase nada al respecto, siendo uno de sus discípulos y habiendo citado a los autores que se pronunciaron sobre estos fenómenos.

zas y los patios...Todo el mundo sabe que en el Perú, y la Jamaica, parajes donde son frecuentes los terremotos, las casas no tienen más que un piso, y en las que tienen dos, el segundo es de madera ligera: lábranle con vigas largas y corpulentas puestas de canto, las cuales tienen afianzada la mampostería...dejo a la prudencia de quien tocara escoger el método más seguro de fundar y fabricar, y si mi trabajo fuere de alguna utilidad al lector para aliviar algún poco la aflicción y consternación que causan estos movimientos tan estupendos y extraordinarios de la naturaleza, tendré por muy bien empleado el tiempo que en esto he gastado».

A todo lo largo del siglo XIX se fueron sentando las bases físico-matemáticas de la Sismología, transformándose en una verdadera disciplina científica. De entre todos los protagonistas, merecen ser destacados los franceses Agustin Louis Cauchy (1789-1857) y Siméon Denis Poisson (1784-1840), así como los ingleses George Gabriel Stokes (1819- 1903) y



THE PORTE COCHERE, ON THE MILITARY ROAD, VILLA GARUSSO, NEAR AULETTA.

Ilustración de la obra de R. Mallet: *Great Neapolitan Earthquake of 1857: The First Principles of Observational Seismology*.

John William Strutt⁴⁵ (1842-1919), puesto que con sus investigaciones permitieron avanzar en el conocimiento de las ondas sísmicas⁴⁶. Junto a todos ellos ha de reconocerse también el protagonismo del ingeniero y geofísico irlandés Robert Mallet (1810-1881) ya que gracias a sus trabajos se consolidó el desarrollo de la disciplina, adquiriendo inclusive su actual denominación. El origen de todo ello ha de situarlo en la presentación de sus *Facts of Earthquake Phaenomena* a la Asociación Británica para el progreso de las Ciencias, en la publicación del catálogo sísmico de la misma asociación o en su celebrada obra *On the Dynamics of Earthquakes, being an attempt to reduce their observed phenomena to the known laws of Wave Motion in solids and fluids*, presentada en 1846 ante la Academia Real de Irlanda. Suya fue también la acuñación de términos científicos tales como epicentro, foco, ángulo de emergencia, isosista y área meizosísmica⁴⁷; o la explicación del efecto del terremoto sobre un cierto edificio, como dependiente de la situación relativa entre su centro de gravedad y el de adherencia.

Su inclinación hacia a ingeniería sísmica le llevó a desplazarse a Nápoles (1858), becado por la Royal Society, para comprobar in situ los terribles efectos del terremoto que había ocurrido en la región de Lucania el 16 de diciembre del año 1857. Allí permaneció durante dos meses estudiando la gran devastación

causada sobre los edificios, haciendo uso por primera vez del reportaje fotográfico. El preceptivo informe le valió para publicar cuatro años después los dos volúmenes de que constó su libro⁴⁸: *Great Neapolitan Earthquake of 1857: The First Principles of Observational Seismology*. En él distinguió las ondas terrestres de las marinas, de las aéreas y de las sonoras. Consideró que las elevaciones de una parte de la corteza terrestre podía ser la causa de los terremotos. También le cupo el honor de haber diseñado un sismógrafo experimental, que aunque no llegó a ser usado, si fue usado su principio para incorporarlo en el que construyó el vulcanólogo napolitano Luigi Palmieri en el año 1855. Entre los años 1850 y 1861 proyectó una serie de explosiones en diferentes lugares para poder así determinar la velocidad de las

⁴⁸ El título completo fue *Great Neapolitan Earthquake of 1857: The First Principles of Observational Seismology as Developed in the Report to the Royal Society of London of the Expedition Made by Command of the Society Into the Interior of the Kingdom of Naples, to Investigate the Circumstances of the Great Earthquake of December 1857*.

ondas sísmicas a través de medios diferentes⁴⁹: arena (251.5 m/s), granito sólido (504,4 m/s) y cuarcita (354.2 m/s).

Pocos años después, en septiembre de 1870, se creó en España su Instituto Geográfico. La decisión fue tomada por el gobierno presidido por el general Juan Prim y Prat (1814-1870), habiendo realizado la propuesta el eminente matemático José Echegaray y Eizaguirre (1832-1916), a la sazón Ministro de Fomento. El primer director del centro fue el ingeniero militar Carlos Ibáñez e Ibáñez de Ibero (1825-1891), el cual sería luego el Director General del nuevo organismo Instituto Geográfico y Estadístico, desde su fundación en 1873. La institución se convirtió de inmediato en un centro de referencia muy respetado por la comunidad científica internacional, baste decir que en el año 1974 ya presidía su director la Asociación Geodésica Internacional y poco después el Comité Internacional de Pesas y Medidas, desde el que se hizo posible la definitiva implantación del

⁴⁹ A juicio del geofísico alemán August Heinrich Sieberg (1924), Mallet debería ser considerado el pionero de la física sismológica.

⁴⁵ Más conocido como Lord Rayleigh.

⁴⁶ Internas y Superficiales, dividiéndose las primeras en P (primarias) y S (secundarias). Las P son ondas longitudinales (dilatación o compresión), produciéndose el desplazamiento en la misma dirección de la propagación, en cambio las S lo hacen en sentido transversal a la misma. La velocidad de las ondas P depende del medio, siendo menores al atravesar el agua que la tierra ($\approx 5\text{km/s}$). La velocidad de las ondas S es un poco menor que la de las anteriores, no se propagan a través de un medio líquido y son las responsables de los daños producidos durante el terremoto.

⁴⁷ En la que se produce el mayor daño ocasionado por el terremoto.



Iglesia provisional de Jatar tras el terremoto de 1884, fotografía realizada por la Comisión francesa presidida por Ferdinand André Fouqué.



Campamento montado en Arenas del Rey tras el terremoto (Comisión francesa presidida por Ferdinand André Fouqué)



Ruinas de la Iglesia de Arenas del Rey (Comisión francesa presidida por Ferdinand André Fouqué)

Sistema Métrico Decimal. Carlos Ibáñez obtuvo al final de su trayectoria profesional el título de Marqués de Mulhacén, como reconocimiento a sus esfuerzos para coronar con éxito el enlace astronómico y geodésico entre los continentes europeo y africano.

Aunque el Instituto se crease pensando principalmente en la inmediata confección del Mapa de España, lo cierto es que sus cometidos superaron con mucho

a los esencialmente cartográficos. El propio Ibáñez se encargó de concretarlos al prologar el primer tomo de las Memorias del Centro, señalando a la geodesia, a la geofísica, a la metrología, al catastro y a la estadística; aunque poco después se ampliasen cuando se le incorporó el Observatorio astronómico y meteorológico. No se puede datar con exactitud cuándo se incorporó el estudio de la sismología al Instituto Geográfico, pero no parece



Grietas junto al pueblo granadino de Güevejar (Comisión francesa presidida por Ferdinand André Fouqué)

Al parecer, Güevejar ya había experimentado un fenómeno similar con ocasión del terremoto de Lisboa (1755). Así se recoge en el Catálogo Sísmico de J. Galbis, al que nos referiremos más adelante.

muy aventurado suponer que debió ser a raíz del gran terremoto ocurrido en el poniente granadino en la noche del día 25 de diciembre del año 1884, aunque también resultase afectada la provincia de Málaga. Pocas novedades se pueden aportar en este contexto⁵⁰, si bien pare-

⁵⁰ El terremoto de Andalucía, como ahora es conocido, ha sido estudiado en numerosas ocasiones desde que se produjo. De entre todas las publicaciones me he permitido subrayar tres de la primera época, otra redactada por un selecto grupo de ingenieros geógrafos en el último tercio del pasado siglo y tres artículos firmados por profesores de la Universidad de Granada en estos últimos años. Helas aquí: Memoria del Comisario Regio, Fermín de Lasala y Collado, nombrado por R.D. del 13 de abril de 1885; presentada en el año 1888.

Ferdinand André Fouqué. Mission d'Andalousie, Etudes relatives au tremblement de terre du 25 décembre 1884, et à la constitution géologique du sol ébranlé par les secousses. V. XXX de las Memorias de la Academia de Ciencias.

Martinez y Aguirre. C. Los temblores de tierra. Estudio de estos fenómenos en las provincias de Málaga y Granada durante los siete últimos días del año 1884 y enero de 1885. Málaga. 1885.

López Arroyo A., Martín Martín A.J., Mézcua Rodríguez J. El Terremoto de Andalucía del 25 de



Los Tajos de Alhama (Comisión francesa presidida por Ferdinand André Fouqué)



El nuevo pueblo de Arenas del Rey (1886). (Memoria del Comisario Regio)

ce obligado recordar que el centro de su zona epicentral se localizó en las proxi-

diciembre de 1884. Instituto Geográfico Nacional. 1981.

Saénz Lorite M. Terremoto de Andalucía 1884-85. Sociedad, Territorio, Solidaridad. Boletín de la Real Sociedad Geográfica. C.L.I. 2016 (pp. 215-238).

Vidal Sánchez F. El Terremoto de Alhama de Granada de 1884 y su impacto. Anuari Verdaguer 19.2011. Burgos Nuñez A., Olmo García J.C., Sáenz Pérez M.P. Las viviendas del terremoto de Andalucía de 1884. Una experiencia de arquitectura en serie en el mundo rural de la España del siglo XIX. Geocrítica. V. XXIII. Nº 1252. 2018.

midades de dos pueblos: Arenas del Rey y Játar; con la particularidad de que el primero resultó prácticamente destruido⁵¹ mientras que en el segundo los daños fueron de menor entidad, a pesar de estar más cerca del epicentro. Hay práctica unanimidad al fijar algunos de los parámetros asociados al terremoto principal: hora (21h 8m), duración (\approx 20s),

⁵¹ De hecho tuvo que ser reconstruido en otro lugar.

coordenadas (latitud 36o 57', longitud 3o 59'W. G), magnitud (\approx 6.7), profundidad (entre 10 y 20 km), zona afectada (\approx 120x 70 km²), intensidad en la zona epicentral (IX-X).

En el resto de la información se encuentran divergencias, dependiendo de la fuente consultada. Los mapas de isosistas, por citar una de ellas, son diferentes, según se elija el de la Comisión Oficial española (IGM), el de la Comisión de la Academia dei Lincei de Roma, el de la Comisión de la Academia de Ciencias de París o el que formó el ingeniero de minas malagueño Domingo Orueta Duarte, el cual estudió el terremoto siendo aún estudiante. Análogo panorama se presenta con relación a las viviendas afectadas, en Arenas del Rey por ejemplo resultaron 397, según la Comisión Oficial, 350 según D. Orueta y todas a tenor de lo informado por la Comisión francesa. Igual sucedió con el número de víctimas mortales y con el de heridos, aunque se estimen las primeras entre 750 y 900. El capítulo de daños es estremecedor, en cualquiera de las referencias bibliográficas. De nuevo particularizo en Arenas del Rey, llamado así antes del seísmo, por razones familiares⁵². En el libro editado por el Instituto Geográfico, se da cuenta de todos ellos, señalando que se abrieron varias grietas bastante largas y con una anchura de entre 20 y 30 cm, destacando una en el centro del pueblo de unos 30 m de longitud y de 4 a 10 cm de ancho, presentando sus bordes algún desnivel, que atravesó un edificio al que dividió en dos. Güevejar fue otra de las poblaciones que se vio especialmente afectada a pesar de estar muy alejada

⁵² El terremoto ocurrió siendo muy pequeños mis abuelos maternos. Los abuelos paternos de mi madre, vivían en el pueblo que fue destruido y padecieron el terremoto con todas sus consecuencias. En cambio sus abuelos maternos lo sufrieron en Jatar, en mucha menor medida. Recuerdo perfectamente como una hermana de mi abuelo materno me comentaba que el temblor fue terrible, según el relato de sus padres.



Detalle de las nuevas casas en Arenas del Rey. Memoria del Comisario Regio

de la zona epicentral, de hecho todo el núcleo urbano se deslizó sin derrumbarse, de manera que su parte alta quedó rodeada por una grieta semicircular de más de 1 km de largo, y que según se cuenta dividió el tronco de un olivo en dos mitades, una de las cuales siguió el movimiento del terreno.

Alhama de Granada⁵³ fue una de las

⁵³ Como ya se dijo, la información referida a este terremoto es dispar. Según el gobierno civil hubo 307 fallecidos y resultaron heridas 502 personas, en cambio el periódico El Defensor de Granada

poblaciones más afectadas por el terremoto de 1884. Resultaron destruidas más de 1000 de sus casas, siendo heridas entre 400 y 500 personas, con un trágico balance de más de 300 fallecidos, aunque el periódico el Defensor de Granada los cifrara en 473. Ha de tenerse en cuenta que durante el temblor se desprendieron grandes bloques que arrastraron consigo a las casas que sustentaban, siendo esta

cifraba los primeros en 463 y los segundos en 473, D. Orueta por su parte aseguró que habían fallecido 330 personas y habían resultado heridas 500.

**Los árboles más ancianos
Tiemblan, y cual triste augurio
Ladran los fieles alanos
A l escuchar el murmurio
De los pueblos comarcanos.**

**De repente, extraño ruido
Sordo, secreto, profundo,
Cual espantoso rugido
De fiero tigre escondido.
Sintió aquel trozo de mundo**

**Estremeciósela sierra
Desde sus hondos cimientos,
Y vio el hombre, que aún se aterra.
Columpiándose la tierra
Con trémulos movimientos.**

**Crujió la tierra y perdieron
El equilibrio las masas;
Bocas inmensas se abrieron,
Y en los poblados las casas
Con estrépito se hundieron.**

**A l fuerte sacudimiento
Cambió la feraz comarca,
Y en aquel solo momento
Perdió bienes y contento
La hermosa extensión que abarca**

**Los que salvarse pudieron.
Aun sin salir de su asombro,
¡A impulso febril corrieron
A remover el escombro
Buscando á los que perdieron!**

la principal causa del daño sufrido en la ciudad y de las víctimas ya citadas.

Sus conocidos Baños resultaron naturalmente afectados, tal como quedó reflejado en la memoria que realizaron sus responsables, reproducida parcialmente en el libro publicado por el Instituto Geográfico Nacional ya referido: «el manantial cesó de correr tras el terremoto para renacer pasadas cuatro horas, pero con las aguas muy turbias y en escasa cantidad. El caudal fue aumentando y a las cinco de la mañana del día 26 rebosaron la pila, ya que alcanzaron un nivel 50 cm más alto que el que tenían antes del terremoto. Se afirma también que la temperatura ascendió dos grados centígrados y que surgió un nuevo manantial también termal, un kilómetro al este del antiguo; y que en un punto cercano a una cañada que desemboca en el río se formó una cavidad circular, de cuatro metros de diámetro, de cuyo fondo brotaba una enorme cantidad de agua que llegaba hasta un nivel de un metro de altura de los bordes superiores. Emitía el manantial abundantes vapores y en su superficie podían observarse un número considerable de burbujas, indicativo de la gran cantidad de gases que contenía, revelándose a gran distancia la presencia de ácido sulfhídrico por su olor».

El daño causado en el casco urbano de Alhama de Granada fue tan considerable que hubo que construir un barrio nuevo en una zona de probada estabilidad, al igual que sucedió en Albuñuelas, Güevéjar, Zafarraya y Periana, este último en la provincia de Málaga. Más drástica fue la decisión adoptada en Arenas del Rey, ya que hubo que edificar un nuevo pueblo en un emplazamiento diferente al que ocupó el antiguo. El lugar elegido se localizó en terrenos situados a 300 metros del antiguo núcleo, una vez que se llegó a un acuerdo con el Instituto de Fomento del Trabajo Nacional de Barcelona, que había adquirido otros para edificar también algunas casas. El

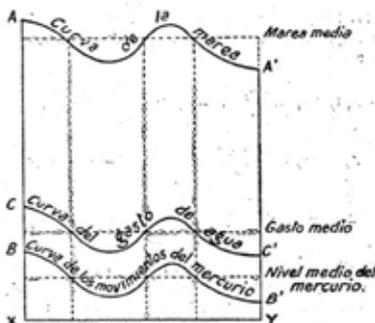
MAREÓMETROS Y MAREÓGRAFOS DE SIFÓN ⁵⁴

POR
EDUARDO MIER Y MIURA

PRIMERA PARTE TEORÍA DE LOS MAREÓMETROS Y MAREÓGRAFOS DE SIFÓN

I.—Principio fundamental de los mareómetros y mareógrafos de sifón.

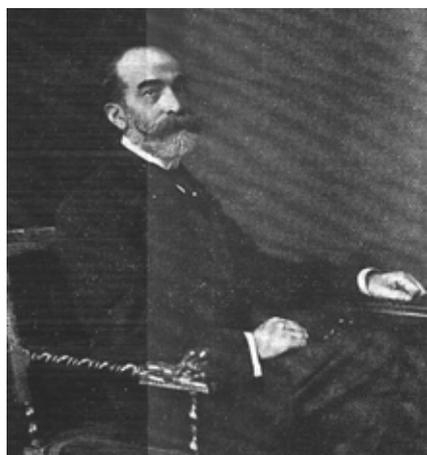
El principio general en que están fundados los mareómetros y mareógrafos de mercurio es en su esencia el mismo en que se basan los usuales sifones, los manómetros de mercurio y otros aparatos análogos. Su manera de funcionar depende del equilibrio estático, siempre buscado, unas veces sin éxito, produciendo, por lo tanto, un movimiento, cual en los sifones sucede, y otras con él, como acontece en los manómetros; equilibrio que siempre tiende á establecerse entre las masas de diversas sustancias líquidas y gaseosas encerradas en un tubo, provisto de una ó varias curvaturas, y sometidas á la acción de la gravedad y á la expansión propia, que en resumen determinan una serie de fuerzas, que buscan por su destrucción mutua el reposo aparente de la materia, ó determinan el movimiento de ésta, en los casos en que aquella compensación no se verifica.



Teoría de los Mareómetros y Mareógrafos de Sifón. Revista de Obras Públicas (1908).

pueblo Santa Cruz de Alhama pasó a denominarse Santa Cruz del Comercio, reconociéndose así las ayudas recibidas del gremio madrileño para paliar, en la medida de lo posible, los daños ocasionados por el terremoto.

En el proyecto de las nuevas edificaciones se procuró tener en cuenta la prevención sísmica, diseñándose solo con dos plantas; en cuanto a las calles, tendrían una anchura mínima de diez metros salvo las de Albuñuelas, que por su especial configuración solo tuvieron seis. Tal como se recoge en el libro del



Eduardo Mier y Miura. Coronel de Ingenieros e Inspector General del Cuerpo de Ingenieros Geógrafos.

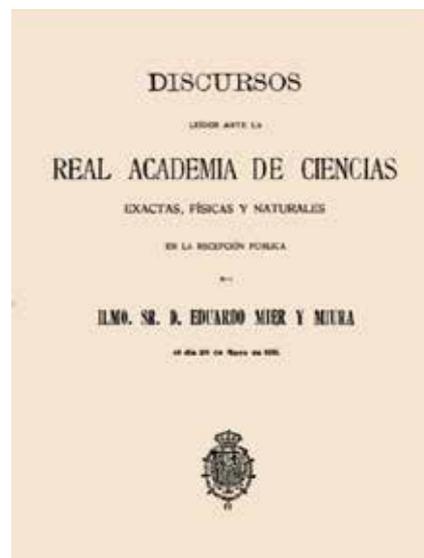
Instituto Geográfico, se dotó a las casa de una buena cimentación «cuya profundidad llegó a ser superior a la altura aparente del edificio, lo que contrasta gravemente con la casi inexistencia de la misma en las casas construidas antes del terremoto. Después se procedió a una elección adecuada de los materiales y a un control cuidadoso de la ejecución de acuerdo con las técnicas usuales entonces». Cinco fueron los tipos de casas proyectadas, aunque todas tuvieron similares características constructivas y con unas superficies comprendidas entre 40 y 151 metros cuadrados, a fin de que hubiese una cierta correlación entre las pérdidas sufridas y la casa recibida.

Culmina esta apretada reseña con un sentido homenaje a todas las víctimas de este devastador terremoto, reproduciendo para ello algunas estrofas del Cuadro que le escribió la poetisa jerezana Carolina de Soto y Corro en el año 1885, titulado El Terremoto de Andalucía, antes y después de ocurrir en las provincias de Granada y Málaga, la noche del 25 de diciembre de 1884; con una dedicatoria a la Infanta María Isabel Francisca de Borbón, hermana del rey Alfonso XII, conocida popularmente como la Chata. La obra constó de las seis escenas

siguientes: la Cena, la Boda, el Regreso, el Cataclismo, los Desvalidos y la Caridad. Como es obvio, la del cataclismo fue la referida al terremoto propiamente dicho, habiéndose elegido de todas sus quintillas las seis siguientes:

Tanto los efectos del terremoto de 1884 como sus numerosas víctimas conmocionaron a muchos estamentos de la sociedad española, aunque lo hiciesen en menor medida dentro del selecto colectivo de los ingenieros militares ya que ellos estaban al tanto de esos fenómenos; no en vano el comandante Manuel Cortés y Águlló ya había publicado en Manila (1881) los dos volúmenes de su obra Los terremotos, sus efectos en edificaciones y medios prácticos para evitarlos en lo posible, la cual mereció los elogios del sismólogo y militar francés Fernand Montessus de Ballore, que acabaría siendo el primer director del Servicio Sismológico de Chile. Un año después de dicha publicación (1.07.1882) ingresó en el Instituto Geográfico y Estadístico un joven y brillante ingeniero del ejército, llamado sin duda por el prestigio de que gozaba ya la institución⁵⁴, me estoy refi-

⁵⁴ Así se reconoce en el comentario realizado por el académico José Rodríguez Mourelo en su elogio de Eduardo Mier y Miura: «Por eso nada



riendo al sevillano Eduardo Mier y Miura (1852-1917). Su primer destino fue en el área de geodesia, integrándose de inmediato en la brigada constituida para ultimar el enlace geodésico entre las Islas Baleares y la Península, trasladándose a las mismas a comienzos del mes de febrero de 1883.

Su frenética actividad investigadora comienza desde su ingreso, destacando en primer lugar una de sus aportaciones gravimétricas, la invención del llamado gravígrafo, un trabajo publicado por varias revistas e informado favorablemente por la Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, firmando el mismo como Capitán de Ingenieros en el año 1891. En el año 1894 se le concedió la Cruz de 2ª clase al Mérito

Militar por la obra Teoría de los Mareómetros y Mareógrafos de sifón⁵⁵. En el año 1900 se creó el Cuerpo de Ingenieros Geógrafos figurando Mier como Ingeniero Jefe de Segunda Clase en el escalafón del 1 de octubre de 1902. Para entonces ya debió haberse interesado en los temas sismológicos, puesto que fue nombrado delegado español en la Asociación Inter-

más conforme a sus aptitudes, a sus aficiones y a sus modos de trabajar, que nuestro benemérito Instituto Geográfico y Estadístico, y allí fue Mier, y allí permaneció hasta el fin prematuro de su vida, acaso impulsado por el renombre de don Carlos Ibáñez, que había constituido un Centro de trabajo útil, de verdadera Ciencia, en el que tan excelente acogida tuvieron las ideas de Mier, sus invenciones y sus iniciativas, siempre fecundas en todos los órdenes».

⁵⁵ Esta obra fue publicada años después en la Revista de Obras Públicas (Ministerio de Fomento.1908). Mier era por entonces Jefe de los estudios de mareógrafos en el Instituto Geográfico. Su proceder fue completamente altruista, tal como él mismo señalaba modestamente en su trabajo: «y buena prueba de que ese interés era el único que guiaba al autor, se hallará en el hecho de que este modesto estudio se elevó a manos de la Superioridad hace más de trece años, después de algunos otros dedicados a efectuar estudios experimentales de los nuevos aparatos, y que seguramente no hubiera visto la luz pública sin los persistentes requerimientos de varias personas que así lo solicitaron, obligando, con su cariñoso empeño, a sacar de la oscuridad lo que acaso debiera haber continuado en ella, por bien de todos».

nacional de Sismología. Dos años después presentó durante una Conferencia celebrada en Berlín un sismógrafo de registro eléctrico. En el año 1906 se iniciaron en el Instituto Geográfico los trabajos geomagnéticos, coincidiendo con la extensa memoria que presentó Mier a propósito de la confección de un mapa magnético de España a partir de 500 estaciones de observación; sin embargo el proyecto sufrió diversos retrasos y no comenzó a hacerse realidad hasta seis años después.

Sin embargo su interés por la sismología fue en aumento, como prueba su informe del año 1910 en el que sentó las bases de un Servicio Sismológico para todo el territorio nacional, centrado en Toledo. Las inquietudes sismológicas de Eduardo Mier continuaron plasmándose en numerosos trabajos, como el artículo titulado Algunos datos acerca de la frecuencia de las olas y de su relación con ciertos microseísmos (1908), o su Note sur les stations sismologiques de l'Espagne⁵⁶ y su Memoria acerca de la organización del Servicio Sismológico en España. En la Nota describió la instrumentación de que constaban las estaciones sismológicas de Fabra (Barcelona), Cartuja (Granada), San Fernando (Cádiz), Toledo⁵⁷ y la del observatorio del Ebro (Tortosa. Tarragona). Una novedad añadida, poco conocida, es que en el año 1909 Mier presentó en la Asociación Internacional de Sismología una ponencia solicitando la adopción del esperanto como lengua auxiliar internacional. En cualquier caso sus conocimientos en esta área de conocimiento quedaron evidenciados en su Discurso de Ingreso en la Real Academia de Ciencias Exac-

⁵⁶ Publicada en las «Comptes-rendus des seances de la Troisième réunion de la Commission permanente de l'Association International de Sismologie». Celebrada en Zermatt entre el 30 de agosto y el 2 de septiembre de 1909.

⁵⁷ Su instrumentación destacaba sobre todas las demás.

tas, Físicas y Naturales, leído el día 28 de mayo de 1911, estructurado en cuatro apartados: la utilidad de la sismología, la constitución interna de la Tierra, las causas de los terremotos y los nuevos instrumentos.

Tras indicar que la Sismología permitía señalar el grado de sismicidad de las diversas regiones de la Tierra, así como el peligro de vivir en algunas de ellas o la confianza con que en otras puede permanecerse, prosiguió indicando como los estudios sismológicos prestaban gran atención a la propagación de las ondas sísmicas en las diversas clases de terrenos y a medir la intensidad y velocidad de esos movimientos. Más adelante apuntaba lo siguiente: «utiliza esa ciencia en sus investigaciones instrumentos que sirven para indicar cuáles son los movimientos del terreno o para medirlos por la observación directa o bien para registrarlos, constituyendo los tres grupos de sismoscopios, sismómetros y sismógrafos, de linderos no siempre bien definidos». Igual de oportuna fue su referencia a la supuesta conexión entre Sismología y Meteorología, pues aún parecía obligado rechazar la teoría aristotélica sobre este particular: «Aunque en casos muy contados las indicaciones de los sismógrafos se pueden utilizar con fines meteorológicos y aunque se haya sostenido por muchos que existe estrecha relación entre las perturbaciones de nuestra atmósfera y los fenómenos sismológicos, es lo cierto que la aplicación de la Sismología a la Meteorología no puede estimarse como práctica, ni en ella cabe insistir».

En el segundo apartado desarrolló la importancia de la sismología como el instrumento con el que podría conocerse la estructura interna de la Tierra, aunque se eche en falta alguna referencia a los trabajos previos (1909) del croata Andrija Mohorovicic, que desembocaron en el descubrimiento del límite inferior de la corteza terrestre (Moho). En

cualquier caso tiene el mérito de romper con las clásicas teorías del enfriamiento que pretendían explicar así la formación de las montañas. Igual de destacable es su reflexión a propósito de la difícil relación entre geólogos y geofísicos: «consecuencia natural también es que, por vanidad, se dé frecuentemente el caso de que, siguiendo el símil, los hombres reputen el cantón que habitan como el mejor, y menosprecien los demás, hasta el punto de exagerar desmedidamente la importancia de cuanto saben o hacen a expensas, por supuesto, de la ciencia y el trabajo a que son extraños. Así se explica que no falten geólogos para quienes la Sismología es sólo una parte de sus estudios favoritos, como no faltará quien sostenga la tesis inversa, cuando esta última ciencia adquiera mayor desarrollo, y así se concibe también que existan hombres eminentes que a la Sismología experimental conceden escaso valor, para atribuírsele muy grande a sus investigaciones puramente geológicas, en compensación, quizás, de aquellos otros que otorgan poca o ninguna importancia a estas últimas, al lado de las que realizan en sus observatorios sismológicos».

En el haber de Mier ha de contarse sus referencias a la estructura interna de la Tierra, en la que consideró tres capas o zonas diversas. Un núcleo sólido sería la más interna, envuelta por una especie

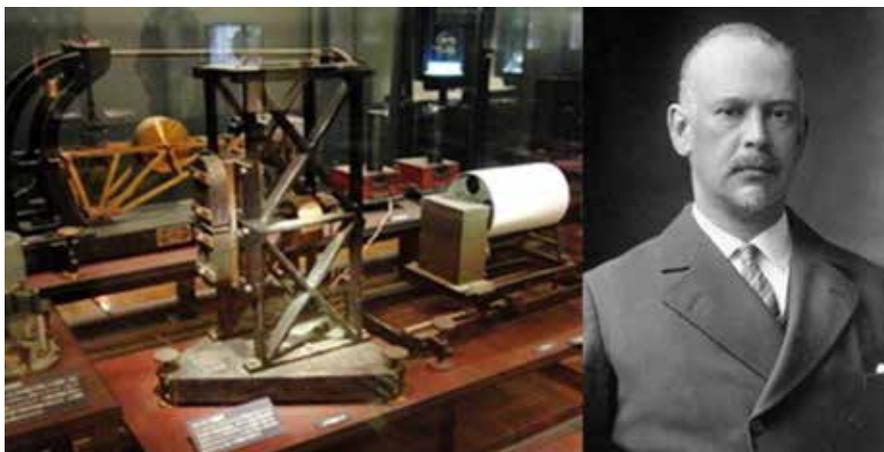
de mar inmenso cuya temperatura no alcanzaría jamás los datos anunciados por una inadecuada interpretación del grado geotérmico; un conjunto que se vería recubierto por la capa sólida de la corteza terrestre, dotada de los movimientos singulares de complicadas formas que registran los sismógrafos. Consiguientemente quedó rechazada así la clásica y antigua concepción de la materia del interior de la Tierra, «a modo de un líquido ardiendo, todo el inflamado, una especie de fuego interno»⁵⁸.

El último apartado dedicado a la sismología instrumental requería tanto espacio que Mier justificó su resumen, aunque señalaría otros asuntos de igual importancia para el estudio de la sismología: «Entre ellos figuraba el estudio de las ondas sísmicas, en el que me proponía demostrar analíticamente lo erróneo de la mayor parte de los cálculos ya realizados para fijar su velocidad media de propagación, y figuraba también una descripción sumaria de los sistemas de instrumentos ideados para la observación y registro de los terremotos, y la exposición algo detallada de algunos sismógrafos por mí ideados». A gran-

des rasgos, abordó Mier dos cuestiones fundamentales: la primera referida a los principios científicos que sirven de fundamento a toda la serie de aparatos sismológicos, que proyectó o ideó, y la segunda, los instrumentos propiamente dichos, aun cuando en su mayoría no hubiesen sido construidos. Ha de valorarse muy positivamente un sistema de registro, original de Mier, propio de los sismógrafos llamados integradores y los aditamentos proyectados para los instrumentos con registro fotográfico⁵⁹, ampliando sus indicaciones y simplificando en gran medida el sistema en favor de la

⁵⁹ Merece la pena reproducir íntegramente la reflexión de Mier: «En teoría, este sismógrafo fotográfico parece ofrecer superioridad grande sobre los instrumentos hoy usados con igual fin: el emanciparse por completo de los movimientos pendulares; la multiplicidad de datos acerca de cada movimiento; la precisión con que el tiempo y los espacios recorridos pueden medirse; la fidelidad y profusión con que se reproducen los movimientos sísmicos verticales, actualmente tan mal registrados y conocidos; la sencillez con que cabe obtener copias de los sismogramas, y hasta la misma facilidad de reproducir ante la vista los efectos de los terremotos, son, en efecto, pruebas de esa superioridad; pero, por desgracia, los gastos del establecimiento de tales aparatos, y, más aun, el desembolso que exige su entretenimiento, hacen temer que se demore su instalación más de lo que fuere de desear».

⁵⁸ Don Eduardo Mier y Miura, obituario por José Rodríguez Mourelo. Este químico y académico fue el encargado de responder al discurso de ingreso de aquel.



El príncipe Galitzin, amigo de Eduardo Mier, y su sismógrafo.



José Galbis Rodríguez luciendo todas sus condecoraciones, incluida la medalla del Cuerpo de Ingenieros Geógrafos (la central de las tres inferiores)

exactitud y de la precisión del propio registro.

Años después⁶⁰ ya pudo sintetizar aún con más rigor la que fue su principal línea de investigación, subrayando que «La Sismología, durante mucho tiempo, ha sido una ciencia empírica; pero en nuestros días ha progresado enormemente, merced a la inteligencia y al entusiasmo de muchos sabios, cuyos nombres se omiten por no hacer poco menos que interminable su enumeración. Estos progresos se refieren principalmente, los unos, a la invención y perfeccionamiento de los instrumentos de observación, y los más, a la manera de utilizar los datos proporcionados por estos últimos, desarrollando largos y difíciles cálculos, en que intervienen conocimientos de orden superior de Física, Mecánica racional y Cálculo diferencial e integral⁶¹. Según

estos estudios, la Sismología instrumental ha llegado a tal grado de perfeccionamiento con el empleo de amortiguadores en los péndulos sismográficos, que ya puede considerarse dominado por completo el abstruso y complejo problema de deducir de los sismogramas todas las características de los movimientos sísmicos».

Eduardo Mier y Miura fue un autor prolífico con un sólido conocimiento de la cultura científica, amén de un investigador centrado no solo en los aspectos teóricos de las disciplinas que abordó sino también de sus inmediatas aplicaciones. Era en palabras de Rodríguez Mourelo «un sabio y un famoso investigador en lo que pudiéramos llamar Geofísica y aún Geomecánica, porque, en rigor, sus trabajos fueron orientados en el sentido de estudiar y medir los movimientos más leves de la corteza terrestre, apreciando su intensidad, su dirección y su forma, y esto de una manera sistemática, para reunir un conjunto de observaciones que permitiesen, andando el tiempo, establecer leyes de cierta generalidad y deducir doctrinas como la que dejó establecida respecto de la estructura interna y la formación de la Tierra». En el elogio que hizo de Mier, tras su temprano fallecimiento, reflejó con sentida emoción el prestigio internacional de que gozaba este ingeniero geógrafo, como prueba la nota a pie de página⁶².

Pero ciñéndonos a la Sismología reviste mayor importancia el comentario que hizo a propósito de la conversación que mantuvo con un buen amigo de Mier, el príncipe ruso Borís Borísovich Golitsin que había inventado el primer sismógrafo electromagnético en el año 1906:

«Tuve el placer de oír el mayor y más caluroso elogio de mi amigo de los labios de una autoridad indiscutible en asuntos de Sismología, del propio Príncipe de Galitzin, con ocasión de la visita a su magnífico Observatorio de Pultkova, durante la cual, y después de haberme mostrado aquella serie de magníficos aparatos, cuya sensibilidad excede a toda ponderación, sólo me habló de Mier, a quien consideraba su sucesor en la presidencia de la Asociación Internacional, tenía en mucha consideración y estima, y creía verdaderamente fundamentales todos sus trabajos e investigaciones. Bien ajenos estaban ambos de la proximidad de su fin, y quién sabe si la muerte del sabio príncipe, contribuyó en mucha parte a terminar la ya minada existencia de Mier: eran, al cabo, dos amigos, cuyas inteligencias, en cierto modo, se completaban, y cuyos trabajos de Sismología eran, por decirlo así, gemelos, aun cuando no participasen de las mismas ideas, y sus pensamientos y sus opiniones tanto difiriesen en lo fundamental y estuviesen llamados, para muy en breve, a ser objeto de una gran controversia científica⁶³».

Eduardo Mier y Miura tuvo un fiel colaborador en otro militar ilustre: el

admirador de su ingenio y de la claridad de su entendimiento; Chapuis, el físico de las medidas precisas, me dijo de Mier que sus ideas, siempre claras y sencillas, tenían para él un atractivo y una simpatía completas; a Lallemand le parecía digno de ser meditado y seriamente estudiado cuanto Mier decía en la Asociación Internacional de Sismología, porque todo era fruto de muy elevados y serios conocimientos, siempre con la marca de una perfecta originalidad.

⁶³ En el epílogo se trata, aunque sea sumariamente, de esa cuestión.

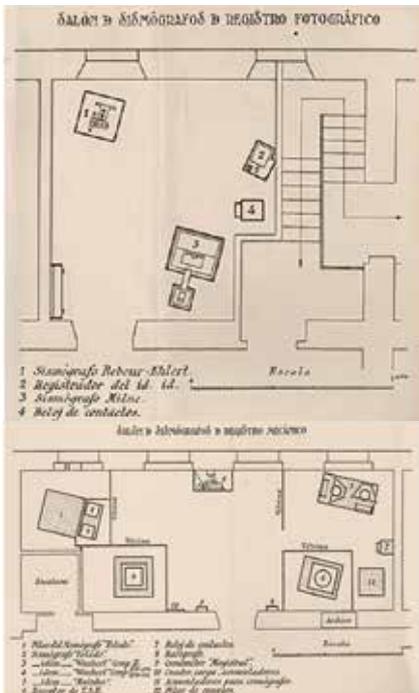
⁶⁰ Artículo Las ecuaciones fundamentales y el amortiguamiento de los sismógrafos (1914)

⁶¹ Esa circunstancia explica, unida a la exitosa gestión del Director General del Instituto Geográfico y Estadístico, que la Sismología fuese competencia de ese centro y no del Instituto Geológico y Minero, que había sido creado en 1849 y había participado en el estudio del terremoto de Andalucía a través de la Comisión correspondiente.



Medalla del Cuerpo Nacional de Ingenieros Geógrafos. La que aquí se presenta perteneció a Fernando Gil Montaner. Cortesía de su nieta Isabel Socías Gil-Montaner, también miembro del Cuerpo.

⁶² Hube de apreciar por mí mismo todo el valer científico de Mier el año de 1913, y bien lejos de España, allá en Petrogrado, donde tuve el honor de representar a nuestra Real Academia de Ciencias en la Asamblea que en aquella gran ciudad celebró la Asociación Internacional de Academias. Fue la mayor concurrencia de Delegados, en la sección de Ciencias, de astrónomos y físicos, casi todos de mucha nombradía y grandes merecimientos. Ni uno solo dejó de preguntarme por Mier, y de hablarme de él con los mayores encomios. Fue el primero el inglés Schuster, quien me dijo de Mier que era un verdadero sabio, por muy contados igualado en lo que atañe a la Física terrestre; para el holandés Sande, en nuestro compañero se reunían las dotes de un investigador de primer orden; el belga Lecointe era ferviente

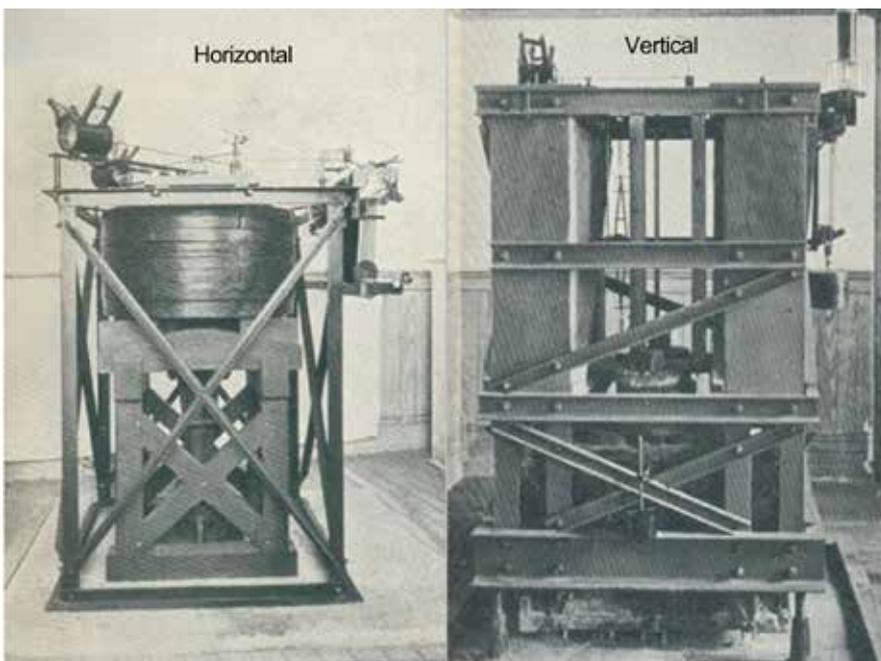


Planos de las salas en que se encontraban los sismógrafos. Estación Sismológica Central de Toledo. Palacio de la Diputación Provincial.

capitán de Estado Mayor José Galbis Rodríguez (1868-1952), el cual ingresó en el Instituto Geográfico y Estadístico en marzo del año 1899. No obstante con-

viene hacer notar que con esa decisión no perdía su condición militar ya que su nuevo destino era considerado como de servicio activo, hasta el punto de tener derecho a caballo y asistente⁶⁴; dentro del Instituto llegó a ejercer como Director General Interino en varias ocasiones. Como en el caso de su mentor, sus actividades en ese centro fueron múltiples aunque se valoren más en este contexto las que desplegó en el área de la Geofísica. Esta reseña sobre Galbis se apoya básicamente en el testamento administrativo que entregó a la biblioteca del Instituto, luego reproducido en el libro *El Ingeniero Geógrafo José Galbis al servicio de la Meteorología* (Ministerio de Medio Ambiente. 2005). La publicación de ese libro obedeció al hecho de que

⁶⁴ De hecho ascendió hasta alcanzar el grado de General honorífico de Estado Mayor el 4 de noviembre del año 1932. Ese último nombramiento (Gaceta del 6 de noviembre de 1932, página 876), producido al amparo de la ley correspondiente del año anterior, fue objeto de un Decreto firmado por Manuel Azaña Díaz, como Presidente del Consejo de Ministros y Ministro de la Guerra; siendo refrendado por Niceto Alcalá-Zamora y Torres, Presidente de la segunda República.



Las dos componentes del sismógrafo Wiechert: horizontal y vertical. Toledo

Galbis fue un decidido impulsor de la Meteorología, cuando esta era una disciplina más del Instituto Geográfico, hasta el extremo de deberse a él la creación de los Cuerpos de Meteorólogos y Auxiliares de Meteorología.

En el citado testamento reconoce de inmediato que su mejor mentor y jefe fue Eduardo Mier, que como él ingresó primero como geodesta para transformarse después en Ingeniero Geógrafo. También es digna de mención una de las virtudes que marcaría toda su actividad profesional, la lealtad con la que él asegura que sirvió y que le enseñaron en el Cuerpo de Estado Mayor. El primer cometido que se le asignó fue la compensación de un fragmento de la red geodésica de primer orden, aunque participase posteriormente en la observación de la red de segundo orden, concretamente en triángulos de las provincias de Cáceres y Murcia. Los comentarios que dedica Galbis a la geodesia son tan extensos como sustanciales, incluyendo por otra parte algunos detalles poco divulgados hasta ahora. Sirvan de ejemplo los dos siguientes: por iniciativa suya, y de su gran amigo Luis Cubillo Muro (Ingeniero Geógrafo y luego Director General del Instituto), se adquirieron por primera vez los hilos invar, que serían usados después para medir las bases de la red geodésica de las Islas Canarias; asimismo dio cuenta de la fundación de la Asociación Geodésica Internacional, en el transcurso de la reunión celebrada en Berlín durante los días 15 al 22 de octubre de 1864.

Uno de los capítulos más sustanciales abordados por Galbis en su testamento fue el dedicado a la Geofísica, cuyo amplio contenido se explica en función de las áreas que comenta: Gravimetría, Sismología, Magnetismo terrestre, Electricidad terrestre y atmosférica, así como otra centrada en el Mapa Geofísico de España. Las actividades sismológicas de Galbis son inmediata continuación



Portada de los dos tomos del *Catálogo Sísmico* formado por José Galbis Rodríguez, entonces era Inspector general de Ingenieros Geógrafos. Cuando se publicó el primer tomo era Coronel de Estado Mayor y cuando se publicó el segundo General de Brigada honorario. Obsérvense dos de las denominaciones que tuvo el actual Instituto Geográfico Nacional

de las gravimétricas, las cuales dejó por iniciativa de su tutor Mier Miura, quien acababa de adquirir varios sismógrafos con objeto de que el Instituto Geográfico abordase la investigación sismológica. Tanto Galbis como el Ingeniero Geógrafo Fernando Uriel Dutiés fueron comisionados para buscar emplazamientos de posibles observatorios en las provincias de Toledo, Navarra, Huesca, Alicante, Murcia, Almería y Málaga; procurando que los edificios fuesen cedidos por particulares o por alguna entidad de la administración local, ya que el Instituto no contaba con la correspondiente partida presupuestaria. Sus gestiones fueron tan brillantes como eficaces, ya que en la Memoria redactada al efecto, en el año 1908, se recoge la siguiente propuesta:

- 1º) Establecer una estación central en Toledo en los sótanos del Palacio, en construcción, para la Diputación provincial que tenía un corralillo inmediato; y estaba situado en un borde de la población, alejado del ferrocarril y de las principales carreteras y calles de tránsito.
- 2º) Otra estación en Alicante, en edificio

apropiado que construiría La Junta de Obras del Puerto, a cambio de permitir la trasladar el mareógrafo, que teníamos instalado en los muelles, y les estorbaba. El emplazamiento elegido para la estación sismológica, fue un paseo de la población, con un pequeño jardín próximo.

- 3º) Otra estación debía instalarse en Almería, a uno o dos kilómetros del casco urbano, en unas alturas, construyendo y cediendo el edificio correspondiente, así como un pequeño terreno alrededor, el Ayuntamiento.
- 4º) Otra estación se establecería en las alturas al Este de la población de Málaga zona llamada El Limonar, en edificio también construido y cedido al Instituto por el Ayuntamiento, con jardín alrededor.

Como complemento a la información anterior, es necesario mencionar que todas sus previsiones se vieron pronto cumplidas. En efecto, en el año 1909 se instaló la primera Estación de Toledo, siendo su director el Ingeniero Geógrafo Juan López Lezcano, dos años después ya estaban construidos los Observatorios de Alicante y Almería, cuyos prime-

ros directores fueron, respectivamente, el propio López Lezcano (que había sido sustituido por Vicente Inglada Ors) y Eduardo Torallas Tondo. El Observatorio de Málaga se instaló en el año 1913, siendo dirigido por José Rodríguez de Córdoba, Ingeniero Geógrafo como el resto de sus compañeros. Galbis es igualmente responsable de la elección de Santiago de Compostela, en lugar de Ferrol, como emplazamiento ideal para situar allí el Observatorio sismológico, una elección que efectuó coincidiendo con su campaña gravimétrica, del año 1907, por tierras gallegas. Asimismo es digno de mención que su interés por la sismología siguió latente años después, cuando era el máximo responsable de la meteorología española, en otro caso no tendría explicación el sismógrafo que construyó para que fuese instalado en el Observatorio del Retiro, dentro del Centro que dirigía. Galbis participó, junto a Mier, en la compra de los sismógrafos

Agamenone, Wiechert y Rebeur-Ehlert, que unidos a los Milne, Vicentini y Bosch, adquiridos antes por Mier, convirtieron a la estación sísmica de Toledo en el Observatorio con la mejor instrumentación del mundo.

La proverbial modestia de Galbis explica que mencione, sin apenas darle importancia, la recopilación de datos sísmicos que efectuó y presentó en dos volúmenes: el primero con más de 800 páginas y el segundo con casi 300. Su catálogo sísmico, sin límite temporal inferior, abarcaba hasta el año 1933 incluido y lo confeccionó en los tres años que duró la guerra civil, apareciendo publicado en el año 1940; logrando inventariar más de 4300 sismos localizados en una zona esférica limitada por los paralelos de 25° y 45°, y por los meridianos de longitud 5° E y 20° W G. Galbis resumió en la introducción la gestación del mismo, recordando que el jesuita y médico gaditano Manuel María Sánchez Navarro-Neumann había propuesto durante



Portada del libro *Bosquejo de España*.

la Asamblea Internacional⁶⁵ celebrada en Madrid (1924) que se retomase la confección de catálogos macrosísmicos de carácter global, aunque su propuesta fue rechazada al recomendar que cada país miembro confeccionase el suyo. Galbis siguió interesado en la cuestión y no dejó de recopilar información, sobre todo a partir de su dirección del Servicio Sismológico del Instituto Geográfico. En el capítulo de agradecimientos no dejó de mencionar al propio Navarro Neumann (Director del Observatorio granadino de la Cartuja) y al ingeniero geógrafo Alfonso Rey Pastor, ya que ambos le proporcionaron datos significativos. Esta crucial aportación de Galbis, el primer catálogo sísmico realizado en España, es una fuente inagotable de información, trascendente e imprescindible para abordar de manera rigurosa los estudios de sismicidad histórica en nuestro país.

Sus trabajos en el campo del magnetismo terrestre fueron más de índole

administrativa, ya que estuvieron relacionados con la instalación del deseado Observatorio magnético. Aunque en principio se pensara en Alcalá de Henares, la eficaz gestión del Ingeniero Geógrafo Alfonso Rey Pastor ante el Conde de Romanones, permitió desechar esa idea para situarlo finalmente en los terrenos cedidos por el aristócrata en su finca de Buenavista, próxima a Toledo. La decisión final del cambio de ubicación fue de Galbis, quien también había pensado antes en Villaviciosa de Odón, indicando que de esa manera serían mucho menores las perturbaciones magnéticas asociadas a las instalaciones eléctricas propias del desarrollo industrial. Fue así como ideó la creación de un «Observatorio Geofísico Central de España que abarcase no solo las observaciones sísmicas y las magnéticas, sino que permitiese iniciar las observaciones de electricidad». Igualmente destacable era su intención de montar allí una Unidad metrológica encargada de la contrastación del instrumental empleado en Geodesia y Topografía. El proyecto de Galbis tuvo tan buena acogida, que llegó a felicitarlo por ello el Director General del Instituto en febrero del año 1933.

El inicio de las obras fue tan inmediato que a comienzos del año 1936 estaban prácticamente ultimados los edificios y demás instalaciones. Asimismo conviene añadir que por indicación suya dispuso el referido director que se realizasen las siempre interesantes observaciones ecuatoriales. La estación elegida en el año 1930 fue la montaña Moka en la isla de Fernando Poo, a unos 1800 metros de altitud, y los operadores responsables de las observaciones magnéticas y meteorológicas fueron el Ingeniero Geógrafo Juan Bonelli Rubio y su esposa, que lo sustituyó cuando cayó enfermo; decía Galbis (que por error consignó Emilio) con toda razón: «...y allí permaneció todo el año, ayudado en los trabajos por su esposa que evitó así grandes interrup-

ciones en los instrumentos registrados, con motivo de una enfermedad del Sr. Bonelli, inevitable en ese clima. Estos trabajos son dignos del reconocimiento patrio».

Galbis consideraba las electricidades terrestre y atmosférica como otras de las actividades geofísicas que deberían realizarse en su proyectado Observatorio Central. No obstante, la especial incidencia de las segundas en el estudio de las tormentas atmosféricas, le movieron a solicitar la compra de dos registradores Bendorf y un colector de radio, durante su etapa de Director del Centro Meteorológico de Madrid, adscrito en aquella época al Instituto Geográfico. A él se debe asimismo el proyecto de instalación del cable para el registro de las corrientes telúricas en el, luego llamado, Observatorio de Buenavista. Más adelante se refiere Galbis a la necesidad de contar con un Mapa Geofísico de España, que por supuesto debería de ser formado por el Instituto Geográfico. Es de gran interés la observación que hace al respecto: «...que nunca puede realizar el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas...y sin la creación de nuevos Institutos bajo su dependencia que, en muchas ocasiones, invaden atribuciones de otros ya existentes, con la consiguiente merma de los medios que estos últimos puedan necesitar para la prosperidad de su investigación».

Acto seguido detalla el posible contenido del mapa en los siguientes términos: «Los resultados de las numerosas observaciones gravimétricas de toda clase y categoría. La situación de los Observatorios Sismológicos, zonas sísmicas, claramente definidas hasta ahora, con la situación de los focos de los sismos principales que han contribuido a descubrirlas. Las curvas magnéticas de declinación, inclinación y componente horizontal correspondientes a la época en que se realizaron los trabajos del Mapa provisional, si consiguiéramos corregir-

⁶⁵ A la que más adelante nos volveremos a referir.

lo, y si es posible, el coeficiente de su variabilidad, deducida de las series magnéticas de San Fernando, el Ebro y Coimbra. Algún dato geológico que defina las fallas interesantes sismológicamente, previo informe del mapa geológico. Las curvas de límites medios de mareas altas y bajas. Las situaciones de los Observatorios Astronómicos, Geofísicos, y meteorológicos, comprendiendo entre estos últimos, sólo las Estaciones denominadas completas, por realizar observaciones de todos los elementos meteorológicos. Los mareógrafos. Las cotas de todos esos centros y las obtenidas hasta ahora por nivelaciones de precisión, de las capitales de provincia y de los pueblos que por su situación geográfica o geológica ofrezcan interés, especialmente los vértices situados en las cumbres de las cordilleras que definan su dirección, y, en las montañas aisladas de alguna consideración, y por último las de los puntos de la costa, que en unión con otros de las montañas, sirvan de base para el estudio, a través de los siglos, de la estabilidad de continentes y mares». Las sabias recomendaciones de Galbis no se verían cumplidas hasta que varios años después se publicaron los capítulos dedicados a la geofísica, dentro de las sucesivas ediciones del

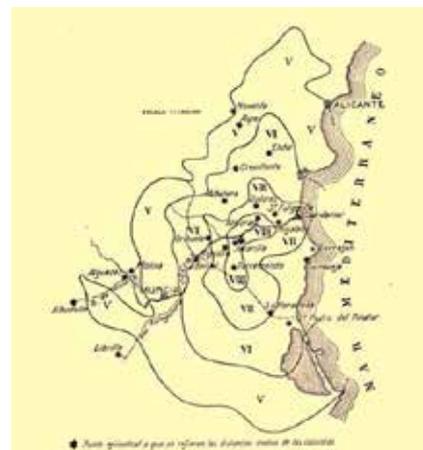
Atlas Nacional de España, uno de los productos emblemáticos del Instituto Geográfico Nacional.

Igual de acertadas fueron sus gestiones para que se celebrase en Madrid la Asamblea General de la U.G.G.I. en 1924, de hecho fue él el que propuso esa sede durante la última reunión celebrada en Roma en la primavera del año 1922. Galbis fue el encargado de coordinar el libro Bosquejo de España, que confeccionó el Comité Español para entregárselo a cada uno de los congresistas. La publicación, conservada también en la citada biblioteca del Instituto Geográfico Nacional, está encabezada por una fotografía del rey Alfonso XIII dedicada a la Unión

Geodésica y Geofísica. El libro es realmente un magnífico resumen geográfico con abundante información turística, incluyendo una valiosa colección de grabados, mostrando tanto a las principales ciudades como a sus tipos populares (sic). El desarrollo de la Asamblea de Madrid, en donde se adoptó como internacional el elipsoide de Hayford, resultó tan del agrado de todos los asistentes que el gobierno francés, siguiendo la recomendación de Ch. Lallemand (Presidente de la U.G.G.I.), le concedió a Galbis la Cruz Oficial de la Legión de Honor. Por otro lado los asambleístas se debieron de ir encantados también por la tradicional hospitalidad española, gracias a la cual se mantuvo abierto, durante el descanso de las sesiones, el bar del Congreso de los Diputados para que los asistentes pudiesen ser servidos gratuitamente por el celebrado restaurante Lhardy. El prestigio internacional de Galbis fue algo excepcional, baste como ejemplo la carta que recibió en el año 1945, procedente de Estados Unidos, firmada por más de veinte científicos americanos (incluidos cinco Premios Nobel). En ella le pedían los nombres de los españoles a los que pudiese interesar las cuestiones de física nuclear, puesto que pretendían dirigirse a ellos para que abogasen por una política de paz tan necesaria en unos tiempos «en que los avances considerables que se van obteniendo en la construcción de la bomba atómica, aumentan enormemente su potencia, y hacen esperar que las próximas guerras serán horriblemente desastrosas para la humanidad».

En su testamento laboral dio cuenta de una situación muy peculiar que tuvo lugar en el año 1932, justamente a partir de que el gobierno decidiera la disolución en el territorio español de la Compañía de Jesús, y que es muy poco referida en la reciente historia de la sismología en España. Galbis resumió a la perfección el problema planteado:

Comprendía esta resolución, la in-



Mapa con las isosistas del terremoto del 10 de septiembre de 1919, en el Bajo Segura. Escala del original 1/1000000.

cautación, por el Estado, de los Observatorios de Cartuja (Granada), y El Ebro (Tortosa), labor que fue encomendada al Instituto Geográfico. Enterado de esto el R.P. S. Navarro Neumann, telegrafió al Director de nuestro Instituto rogándole, que fuese yo el que se hiciese cargo del observatorio de Cartuja, así se dispuso, incorporándolo al Servicio Sismológico oficial, cuya Inspección estaba a mi cargo. Personado en Granada, como no disponía de más Ingenieros, preparados para esa labor, que los destinados en las Estaciones sismológicas, pensé en el señor Guillamón⁶⁶, Jefe de la Estación sismológica de Málaga. Reunido este señor conmigo en Granada, recibimos la instalación del Observatorio de Cartuja, de manos de un hermano de la Compañía de Jesús, por haberse ausentado ya los padres y novicios. Examinamos todos los locales, instrumentos sismológicos, meteorológicos, y astronómicos, así como los archivos, encontrando todo en marcha, y por ello decidimos no interrumpir, ni un momento, la observación, ofreciéndose a ello el citado Ingeniero, sin desatender su Estación de Málaga, cuyos

⁶⁶ Se estaba refiriendo Galbis al ingeniero geógrafo Félix Gómez- Guillamón Guillamón.



Recepción en Praga a los participantes en la Asamblea de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (septiembre de 1927). Se ha identificado con un círculo a Vicente Inglada Ors.

instrumentos observaría en adelante el Topógrafo allí destinado, inspeccionado semanalmente por dicho Ingeniero. Así lo hizo este con gran brillantez e inteligencia, y no sólo sostuvo el Servicio regular de Cartuja, sino que construyó un pequeño pabellón apropiado para la mejor instalación de los sismógrafos que a la sazón estaban en el edificio principal

de los Jesuitas, lo que les sometía a perturbaciones, construyó nuevos modelos de sismógrafos, uno de ellos fotográfico, utilizó los numerosos datos acumulados durante varios años, referentes al clima de Granada, publicando el correspondiente resumen, y dio por último conferencias sobre meteorología y sismología en Granada, sin descuidar la intensa co-



Vicente Inglada Ors con su uniforme de Estado Mayor, junto a la portada de su discurso de apertura de curso en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

LA PROSPECCION SISMICA EN ESPAÑA

DISCURSO

LEIDO EN SOLEMNE SESION INAUGURAL DEL CURSO ACADEMICO DE 1907-08

por el Ilmo. Sr. D.

D. VICENTE INGLADA ORS

EL DIA 11 DE NOVIEMBRE DE 1907



1938 NUEVAS GRAFICAS Rodriguez San Pedro, 36 MADRID

rrespondencia, que el Sr. Navarro-Neumann, mantenía con el servicio Sismológico Extranjero.

La novedosa instalación sismológica de Toledo recibió pronto el impulso definitivo que la convirtió en una de las mejores en su género. El artífice del mismo fue Vicente Inglada Ors (1879-1949), un joven alicantino que había sido ascendido a Capitán de Estado Mayor y se había incorporado como Ingeniero Geógrafo al Instituto Geográfico y Estadístico, en el año 1907; movido quizás por haber pertenecido a la Comisión Topográfica de la isla de Menorca, y haber levantado planos topográficos de la misma en el año anterior. Inglada fue sin lugar a dudas una de las mentes más preclaras que ha tenido el Instituto Geográfico, fue además un investigador incansable y sumamente prolífico; una actividad que se vería facilitada por su condición de políglota consumado⁶⁷. Su primer destino fue en la provincia de Valencia, aunque cuatro años después ganó el concurso convocado para ocupar la plaza de Jefe en el futuro y prestigioso Observatorio Geofísico de Toledo.

NUEVAS FORMULAS para abreviar el Cálculo de la profundidad aproximada del foco sísmico por el método de Kovsligethy y su aplicación a algunos temblores de tierra. Instituto Geográfico y Estadístico. 1921. Vicente Inglada con su uniforme de teniente Coronel y luciendo la medalla del Cuerpo de Ingenieros Geógrafos.

Entre los años 1907 y 1910 participó en numerosas actividades propias

⁶⁷ Entre todos los idiomas que dominaba sentía predilección por el esperanto, en el que llegó a ser un especialista de renombre; hasta tal punto destacó, que el propio fundador de ese lenguaje universal, Leizer L. Zamenhoff, reconoció que lo hablaba peor que el propio Inglada. También es digna de mención su traducción al español de la obra de Alfred Lothard Wegener: Die Entstehung der continent und Ozeane, en el año 1924 (La génesis de los continentes y océanos), publicada en la prestigiosa Revista de Occidente



El reverendo James B. Macelwane con el sismómetro vertical Sprengnether, junto a un fragmento del obituario que dedicó a Vicente Inglada Ors.

VICENTE INGLADA ORS
1879-1949

By the death of Vicente Inglada Ors, January 9, 1949, geophysics in general and seismology in particular have lost an illustrious champion and an indefatigable research worker. At the time of his death, Inglada Ors was Chief of the Seismological Service of Spain, Vice-Director of the National Institute of Geophysics, and President of the Section of Seismology of the Spanish Commission on Geodesy and Geophysics.

Vicente Inglada Ors was born in Alicante, Spain, January 9, 1879. He received his bachelor's degree in his native city and in 1896 entered the Academy of Infantry in Toledo, from which he graduated with the commission of infantry lieutenant the following year. In 1898 he entered the War College, and after seven years of study and training he graduated, in 1905, with the grade of Capitán de Estado Mayor. In 1907 he was successful in competition for the post of geographical engineer. In this capacity he completed a number of topographic surveys.



Alfonso Rey Pastor, luciendo la Cruz de Alfonso X el Sabio y La Medalla del Cuerpo de Ingenieros Geógrafos.

del Instituto: cartografía, meteorología, geodesia, magnetismo, gravimetría y sismología, una última materia a la que acabaría dedicándose el resto de su vida. Durante su formación militar había adquirido la formación físico - matemática suficiente como para poder desempeñarla eficazmente, llegando a dominar las ecuaciones diferenciales, básicas para la localización de los focos sísmicos; hasta el extremo de ser considerado como uno de los fundadores de la sismología matemática. Las novedosas fórmulas que dedujo para ello, «las fórmulas de Inglada» fueron reproducidas en la bibliografía internacional especializada, haciendo que pronto se convirtiese en uno de los sismógrafos más relevantes del siglo XX. Dado que para Inglada la sencillez siempre fue primordial, decidió simplificar el tortuoso método empleado por el sismólogo húngaro Radó Von Kövesligethy para calcular la profundidad del foco a partir de los registros del sismógrafo galvanométrico que había ideado B. Galitzin en el año 1916.

La génesis de las mismas ha de situarse en septiembre de 1919, cuando Inglada inspeccionó como delegado gubernativo las consecuencias de un temblor devastador: el terremoto del Bajo Segura, en su Alicante natal. El problema de la profundidad focal llamó su atención

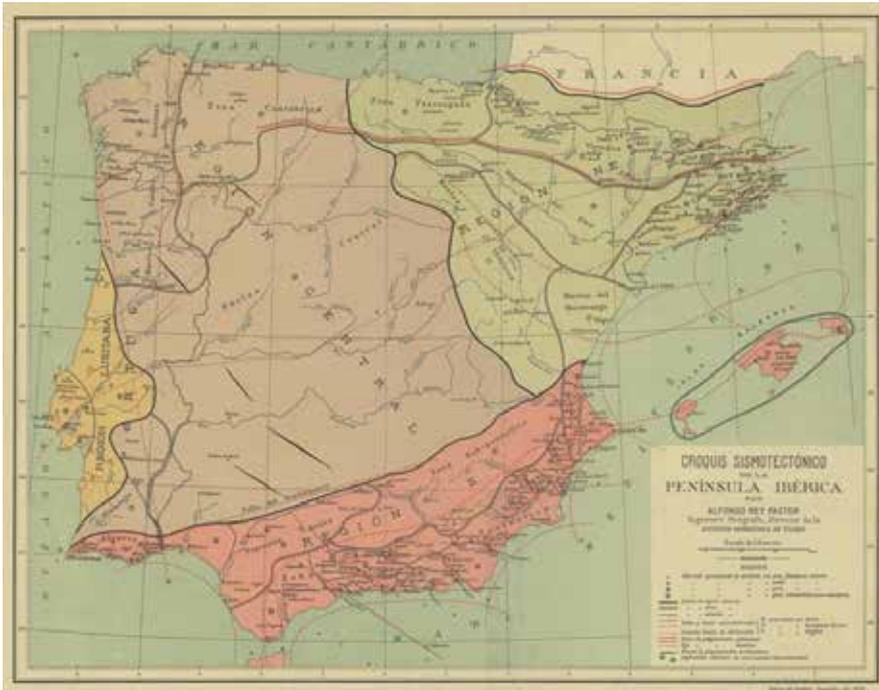
como sismólogo y como matemático. Por ello recopiló datos suficientes como para poder trazar las isosistas, paso previo para el desarrollo de sus nuevas fórmulas: en las que se modificaron parte de las de Kövesligethy gracias a su ingenio matemático y a la experiencia proporcionada por la observación sobre el terreno. Fue así como, a partir de sismogramas ahumados y de las isosistas correspondientes, dedujo que la profundidad del foco debería ser directamente proporcional a la diferencia de los radios de dos isosistas consecutivas⁶⁸. Más tarde introdujo el uso de ábacos, en lugar de tablas, para el cálculo de la profundidad focal, en los casos de terremotos distantes. Andrija Mohorovicic, Harold Jeffreys y Beno Gutenberg, e incluso el propio Kövesligethy, reconocieron pronto la hábil, sensible y decisiva simplificación de Inglada para la pronta resolución de ese tipo de sismos.

Las publicaciones de Vicente Inglada siempre contenían una idea sutil: la armonía mundi, la armonía entre las dife-

rentes partes de la Tierra, pues siempre consideró el planeta como una «unidad científica». Entre 1919 y 1925, gozando ya de tan merecido prestigio, hizo suyas las teorías geofísicas imperantes. Sin embargo encontró los tratados de su tiempo tan compartimentados que se sintió obligado a perseguir la unidad de las ciencias, entendiéndolo que al cultivar cada una de forma aislada no se seguía el ejemplo que ofrecía la Tierra; ya que aunque su corteza exterior estaba fracturada en bloques, las superficies separadas, lejos de separarlos servían para ponerlos en contacto. En la segunda década del siglo ya eran conocidos tres de los mejores libros de Inglada: El Interior de la Tierra según resulta de las recientes investigaciones sismométricas (1919), La Corteza Terrestre (1923a) y La sismología: sus métodos y el estado actual de sus problemas fundamentales (1923b), reflejándose en ellos su particular concepción científica de lo que ahora es conocido como interdisciplinariedad⁶⁹.

⁶⁸ Tras su estudio publicó el trabajo: El Sismo del Bajo Segura de 10 de septiembre de 1919. Cálculo de las coordenadas del foco, basado en la hora inicial de los sismogramas registrados en varias horas próximas. Boletín del Instituto Geológico de España. Tomo XLVII, VII de la 3ª serie. 1926. (pp. 36-50).

⁶⁹ Son igualmente reseñables las Conferencias sobre Sismometría por B. Galitzin, traducida por los ingenieros geógrafos V. Inglada Ors, José Gaarcía

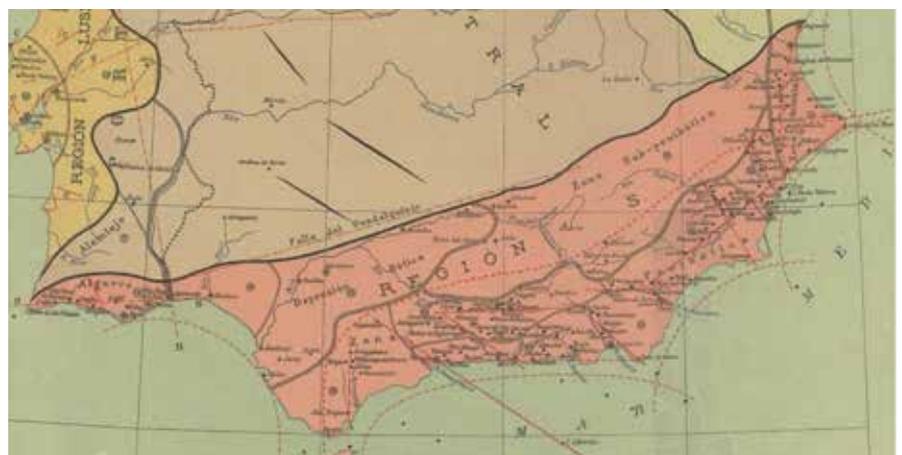


Croquis Sismotectónico de la Península Ibérica, un excelente ejemplo de cartografía sísmica presentado por Alfonso Rey Pastor en la Asamblea de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica, celebrada en Madrid durante el año 1924. El Mapa fue publicado por el Instituto Geográfico.

Su actividad al frente del Observatorio la compaginó siempre con su vocación militar y docente, máxime cuando siguió ascendiendo mientras ejercía como Ingeniero Geógrafo. Se entiende así que en el año 1923, coincidiendo con la llegada a ese centro de un nuevo ingeniero geógrafo, decidiera retomar su carrera militar con el empleo de Teniente Coronel, justamente cuando gozaba de muy buena reputación científica. El sismólogo se convirtió así en profesor de la Escuela Superior de Guerra, cargo que mantuvo hasta 1928, impartiendo clases de algoritmos matemáticos, astronomía, geodesia y meteorología. Inglada fue un excelente profesor, principalmente porque sus clases tenían siempre una componente didáctica considerable, derivada de sus propias

Siñeriz y Pardo Moscoso, y Wenceslao Castillo. En cualquier caso, la producción bibliográfica de Inglada se detalla con el rigor debido en la Revista de Estudios Alicantinos, gracias al excelente trabajo de F. Rodríguez de la Torre.

experiencias de campo. Su talento para la oratoria era extraordinario, acompañado de una memoria prodigiosa; dos cualidades que siempre dejaba ver en las numerosas conferencias que impartió en los años siguientes, tratando de hacer ver la importancia de la sismología. En 1924 tomó parte en la Asamblea Internacional de la Unión Geodésica y Geofísica, ya



Detalle de la Región Sísmica Sur, según el Croquis Sismotectónico de la Península Ibérica. Alfonso Rey Pastor. 1924.

comentada, y recibió una nueva Cruz al Mérito Militar de 2ª Clase por su obra gravimétrica⁷⁰. En el año 1927 deslumbró a la Asamblea de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica, celebrada en Praga.

Fernando Rodríguez de la Torre⁷¹ resumió perfectamente la favorable impresión que causó: «Entre los días 3 al 10 de septiembre de 1927 celebró en Praga la Asamblea de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica. Inglada asiste como delegado oficial y se adscribe en la Sección de Sismología, que preside el inglés Mr. Turner. Se realiza una sesión conjunta con la Sección de Vulcanología. Interviene Mr. Turner que señala como método modélico para el estudio de erupciones volcánicas por medio de los sismos que producen el presentado por otro congresista. Inglada pide la palabra y analiza tres errores de bulto, que desmenuza según el estado de la ciencia y de sus propias investigaciones. La sesión conjunta queda electrizada por la intervención de Inglada, contundente, incontrovertible, científico. El Presidente enmudece y su reacción es... muy británica: ¡presenta su dimisión! Pero Inglada, caballeroso, habla con varias delegaciones para que insten de Turner que reconsidere su actitud; y Turner

⁷⁰ Observaciones gravimétricas. Instituto Geográfico y Estadístico. 1923.

⁷¹ Vida y Obra de Vicente Inglada Ors (1879-1979). Revista de Estudios Alicantinos. Número 32. 1981

desiste. El triunfo científico de Inglada excede del ámbito de la Asamblea».

Entre 1925 y 1928 fue ganador de cuatro premios a la investigación científica convocados por la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Precisamente fue en ese año de 1928 cuando es elegido miembro de la misma, Para su discurso de ingreso eligió el título Trascendencia científica de los fenómenos sísmicos, leyéndolo el 6 de febrero de 1929 y siendo respondido por José María de Madariaga y Casado, ingeniero de minas y catedrático de Electrotecnia. El discurso lo pronunció ocupando de nuevo su puesto de ingeniero geógrafo en el Instituto Geográfico y Estadístico, pues se había incorporado otra vez en el año 1928. En esta ocasión fue destinado al Servicio de Geodesia, aunque más tarde pasase a dirigir la Sección de Sismología, dentro del Laboratorio de Geofísica. Como apertura del curso 1930-1931 pronunció en la Real Academia de Ciencias Exactas

Físicas y Naturales un meditado discurso sobre la Prospección Geofísica. Proclamada la segunda república se acoge al Decreto que regulaba el retiro voluntario de los militares, causando baja definitiva en el ejército.

Al estallar la guerra civil es ignominiosamente separado del servicio al obligarlo a jubilarse sin sueldo. Como es de suponer pasó toda clase de penurias, aliviadas en parte por la mediación de varios sismólogos extranjeros. Finalizada la guerra se incorporó de nuevo al Instituto Geográfico, siendo nombrado Secretario Técnico del mismo y luego Jefe del Servicio Sismológico Nacional. Cuando en 1941 se creó el Instituto Nacional de Geofísica, dependiente del Patronato Juan de la Cierva, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, se encargó de la dirección de la Sección de Geofísica Pura. Cuando falleció en el año 1949 todavía conservaba fuera de España un prestigio científico al alcance solo de los privilegiados, la mejor muestra de ello fue el elogio

que realizó el jesuita y sismólogo americano James B. Macelwane (julio de 1949) a instancias de la Seismological Society of America, el cual fue incluido en el Boletín correspondiente: 39. Vicente Inglada Ors 1879-1949. (pp.219 y 220). Mucho más reciente (2007) es la biografía efectuada por el investigador vasco Aitor Anduaga Egaña: Inglada Ors, Vicente, en Noretta Koertge ed., New Dictionary of Scientific Biography (New York: Charles Scribner's Sons), vol. 4, 10-12; señalando que tras ser nombrado Director del Instituto Nacional de Geofísica, en 1941, retomó sus investigaciones en geofísica aplicada.

El último ingeniero geógrafo al que vamos a hacer referencia es Alfonso Rey Pastor⁷²

⁷² Fuera del ámbito sismológico, es poco lo que se sabe de este ilustre sismólogo, quizás por haber sido eclipsado por la arrolladora personalidad de su hermano Julio, el matemático español más citado. Aunque nacido en Burgos, hizo sus primeros estudios en Logroño. De ahí que sea considerado



Padres jesuitas en el Colegio Máximo de Granada. Dos ellos fueron directores del Observatorio de la Cartuja: 1) Manuel María Sánchez-Navarro Neumann (1907-1920) y 2) su discípulo Antonio Due Rojo (1940- 1964).

Actividad sísmica en los años 1901 a 1934

Días sísmicos de grado	1901	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	Total
II-III			1		1	1					2		1	6	2	13	4	3	2				1	1			1	1	1	1	3		1	2	48
IV					2	5	2	1					2				3	1	3	1	3	1	2	1				1	2	1	1	1	2	1	36
V				1				1	1	1	1		1			4	1		3															13	
VI					1	1	1												1															4	
VII								1									1	1																3	
VIII																																			
Totales	1	4	2	6	3	3	3	3	1	4	6	2	21	6	4	9	1	3	2	3	1	1	2	3	1	1	2	3	2	4	1	3	3	104	

**ZONA DE GRANADA
Cuadro XVII**

EPICENTROS	DÍAS SÍSMICOS GRADO							Sacudidas	AÑOS
	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	Total		
Albendín	1	1					2	2	1933 (1) 1934 (1)
Alhama		4	1				5	5	1907 (1) 1918 (1) 1923 (1) 1924 (1) 1932 (1)
Arenas del Rey	1		1				2	2	1908 (1) 1917 (1)
Cajar	1						1	1	1934 (1)
Fuente Vaqueros	1	1					2	2	1931 (2)
Gabía la Grande	1	2					3	4	1919 (1) 1921 (1) 1922 (1)
Guádix		2					2	2	1910 (1) 1917 (1)
Granada	11	7	3	1			22	30	1904 (1) 1907 (3) 1910 (1) 1911 (2) 1912 (1) 1916 (1) 1919 (2) 1920 (2) 1922 (2) 1923 (1) 1927 (1) 1929 (1) 1930 (2) 1931 (2)
Iznalloz				1			1	1	1901 (1)
Jayena			1				1	1	1912 (1)
Loja	13	6	5	1	1		26	52	1908 (1) 1909 (1) 1910 (1) 1913 (1) 1917 (19) 1920 (3)
Mondújar		2					2	3	1919 (2)
Padul		2					2	3	1925 (1) 1929 (1)
Peligros	2		1	1			4	11	1920 (4)
Pinos-Puente		2					2	2	1928 (1) 1931 (1)
Santafé	8	1	1		2		12	14	1911 (1) 1912 (1) 1914 (3) 1924 (1) 1918 (5) 1919 (1)
Sierra Elvira	1	1					2	2	1933 (1) 1934 (1)
Ventas de Huelma		3					3	5	1914 (1) 1924 (1) 1929 (1)
Ventas de Zafarraya	8	2					10	11	1909 (2) 1915 (2) 1928 (1) 1916 (1) 1915 (4)
Epicentros: 19	48	36	13	4	3		104	153	104

Resúmenes estadísticos incluidos por Alfonso Rey Pastor en su trabajo de referencia.

(1890-1959), el cual ingresó en el Instituto Geográfico en septiembre del año 1920, por el turno de Estado Mayor, con el grado de Capitán. Por aquel entonces estaba destinado en África, recopilando información cartográfica de la zona como miembro de la Comisión de Límites de Marruecos, plasmada luego en mapas tan interesantes desde el punto de vista estratégico como el Croquis de la Región de Melilla (escala 1/25000.1921) y el Mapa de Marruecos (escala 1/1000000.1922). Su pri-

un riojano más, como señalan sus biógrafos más recientes, que tan recientemente lo sacaron del anonimato: 1) Alfonso Sánchez-Gabriel Fernández Giro. Alfonso Rey Pastor, trayectoria de una vida profesional y científica (Instituto de Estudios Riojanos. 1996) y Fernando Rodríguez de la Torre. Biografía del sismólogo Alfonso Rey Pastor (Instituto de Estudios Riojanos.2000).

mer destino civil fue como Segundo Jefe del Observatorio de Toledo, dirigido por Vicente Inglada Ors, el cual lo inició en el estudio de la sismología; una actividad a la que se dedicaría, con gran aprovechamiento hasta su fallecimiento. Tras su periodo de formación fue nombrado Director del Observatorio en el año 1923, coincidiendo con la reintegración a la carrera militar de su maestro.

Sin embargo no olvidaría sus inquietudes topográficas y cartográficas, demostrándose las primeras con su magnífico Plano de Población de Toledo (1/4000. 1926), tanto en su versión planimétrica como en la exclusivamente altimétrica: Plano Topográfico del Cerro de Toledo (Escala gráfica. 1927), curioso levantamiento con una equidistancia de 5m, que evidenció sus conocimientos geomorfológicos y con el que llegó a demos-

trar que la ciudad imperial se asentaba sobre doce colinas y no sobre siete como marcaba la tradición⁷³. En cuanto a las cartográficas, hay otros dos ejemplos sumamente elocuentes, que contribuyeron a considerarlo desde entonces como referencia obligada en este tipo de estudios. Se trata del Croquis sismo-tectónico de la Península Ibérica, formado

⁷³ Durante su estancia en Toledo, siendo ya Comandante (1925), compaginó su incesante actividad sismológica con su afición a la arqueología, así se resume esa faceta en una reseña de la Real Academia de la Historia: «... continuó desarrollando durante los años siguientes su trabajo en el Observatorio de Toledo, ciudad en la que en estos años se inició su afición por la arqueología, cuando al encontrarse realizando unos levantamientos topográficos para una ampliación del plano de la ciudad de Toledo, realizó un minucioso estudio de las ruinas del circo romano en la Vega Baja y del anfiteatro en el barrio de las Covachuelas».

para presentarlo en la asamblea de la Unión Geodésica y Geofísica Internacional (Madrid 1924) y el no menos interesante Traits sísmiques de la Péninsule Ibérique, que presentó en la asamblea que celebró en Praga (1927) la misma Asociación.

El mapa presentado en Madrid fue dibujado a escala 1/3.000.000, dividiéndose la Península en cuatro zonas sísmicas de diferente color, a saber: Región Lusitana, Región Central, Región Noreste y región Sur. Dentro del campo del mapa se identificaron los ríos más relevantes y otros accidentes geomorfológicos de interés, como Depresiones, Montes, Macizos etc. La información sísmica propiamente dicha se ofreció ateniéndose a un detallado cuadro de signos convencionales, referidos a los epicentros⁷⁴, a las regiones, zonas y comarcas sísmicas, fallas y líneas sismotectónicas, grandes líneas de dislocación, zonas y ejes de plegamiento y dos indicativos numéricos relacionados con los coeficientes de sismicidad.

En cuanto a la comunicación presentada en Praga, fue estructurada en cuatro capítulos, indicando Rey Pastor en su introducción la importancia que tenía el estudio de la sismicidad global y su distribución en diferentes regiones para tres ramas singulares de las Ciencias de la Tierra: sismología, geología y geografía. Reseñando a continuación que el análisis del comportamiento sísmico de cada bloque de la corteza terrestre era una línea moderna de investigación, que puesta al servicio de la geología podría proporcionar consecuencias trascendentales bajo el prisma de la tectónica regional⁷⁵. Una de las conclusiones del trabajo sigue estando vigente⁷⁶: «aproximadamente el 50% de todos los sismos ibéricos tiene lugar en la región meridional; el 20% en la del NE; el 15% en la del occidente; el 5% en la Región

Central y el 10% restante corresponde a puntos imprecisos. Durante el periodo 1917-1926, minuciosamente analizado, resulta que el número de días sísmicos presentes en cada año, se aproxima bastante a la media general de 83, obtenida en su conjunto, o sea que ofrece una gran uniformidad en su frecuencia. En cuanto a la intensidad, se aleja del sismo de los Pirineos (1923, con una sacudida de grado VIII». Esos estudios fueron continuados en años sucesivos por Rey Pastor, actualizando parcialmente las informaciones anteriores, así procedió por ejemplo en su obra Estudio Sismotectónico de la Región Sureste de España, presentada a la Comisión Nacional de Geodesia y Geofísica en el año 1951.

La sismología instrumental fue una de sus líneas de investigación, como prueba su monografía Estudio Crítico de los Aparatos de la Estación Sismológica de Toledo, presentada en el congreso de las Asociaciones Española y Portuguesa para el progreso de las Ciencias, celebrado en Barcelona 1929. Dentro de sus actividades regladas estaba por supuesto el seguimiento de los sismos registrados permanentemente en la Estación, procediendo al estudio concreto de los que estimase de mayor impacto, la lista de ejemplos así lo certifica, encabezándolo El sismo de la Rioja Baja de 18 de febrero de 1929, publicado por el Instituto Geográfico y Catastral en el año 1932. Igual sucedió con otras de sus investigaciones sismológicas, todas ellas a cual más notable: El Servicio Sismológico español, 1932; Datos sísmicos de la Península Ibérica, Barcelona, 1934; Carta de sismicidad del Globo para el periodo 1899-1930, Toledo, 1935; Sismicidad de las regiones litorales españolas, 1935; Sismicidad de las Regiones Bética y Subbética⁷⁷, 1936.

En ese último trabajo de Alfonso Rey Pastor se incluye una significativa descripción de la zona sísmica de Granada, que parece conveniente reproducir por la continuada ocurrencia de terremotos en la zona. Sus límites

geográficos eran a juicio de Rey Pastor los siguientes: «en sentido E-W, desde Loja a Guadix, por el S hasta los macizos cristalinos de Nevada y Sierra Tejeda, y por el N, termina en el contacto del manto terciario de la depresión con el Secundario de la cordillera. Al NE, está situada la línea transversal de fractura Guadix-Gata, y por el SW, la de Alhama-Motril». Indicaba asimismo que los focos sísmicos se agrupaban principalmente en los alrededores de Granada, con densidad notable y actividad frecuente. La localización geográfica de los epicentros parecía indicar, en su opinión, «la existencia de otra fractura transversal desde Pinos Puente a Mondújar, casi paralela a las dos extremas. En la parte del SW, queda un núcleo derivado de la actividad de Sierra Tejeda, donde están centros tan violentos como el de Alhama. El foco de Iznalloz queda aislado, el de Loja puede dimanar de la prolongación de la falla transversal de Alhama».

Continuaba Rey Pastor refiriéndose a los terremotos ocurridos en el periodo comprendido entre los años 1901 y 1934, señalando que «de los 19 epicentros identificados...resulta ser el de mayor frecuencia, Loja con 26 días, ocurridos en su mayoría durante el intenso periodo de 1917, cuyo máximo choque llegó al grado VII de intensidad; en el año 1920 tuvo lugar otro pequeño ciclo de actividad. Sigue en importancia el foco de Granada, si bien es de advertir que la situación del Observatorio influye en el aumento de registros de numerosísimas sacudidas de tipo débil. Otros focos de significada frecuencia son los de Santafé y Ventas de Zafarraya. En conjunto, se nota una concentración de actividad en el núcleo Granada-Santafé. El coeficiente medio para la zona es el de tipo máximo de la Península, considerando solamente las noticias y registros que hemos podido conseguir en el periodo citado de los primeros 34 años de esta centuria. La frecuencia absoluta, considerando pequeñas áreas, es en cambio inferior a la obtenida para el núcleo de Murcia y costa catalana».

Tras el paréntesis de la guerra civil, fue destinado al Observatorio de Alicante, donde continuó con sus investigaciones sismológicas hasta que en el año 1953 fue destinado a la sede

⁷⁴ Clasificados en las siguientes clases: de poca frecuencia sísmica, de media y de gran frecuencia sísmica. Detallando aparte aquellos sismos catastróficos de gran intensidad.

⁷⁵ Las ideas expuestas por Rey Pastor parecen actuales, a pesar de haber transcurrido casi un siglo desde que las expusiera en la referida Asamblea.

⁷⁶ Traducción libre del francés.

⁷⁷ Reproducida por la Association pour l'étude géologique de la Méditerranée occidentale. Volume IV. Géologie des Chaînes Bétique & Subbétique. Valence/ Murcie/ Andalousie.

central del Instituto Geográfico, Calle General Ibáñez de Ibero nº 3, siendo nombrado Jefe del Servicio de Magnetismo; permaneciendo en él hasta su muerte. Así se refiere a él la Real Academia de la Historia, en un resumen de José Luis Isabel Sánchez: «Hombre polifacético, también se dedicó a las prospecciones acuíferas y petrolíferas por medio de un aparato por él ideado y diseñado. Participó en numerosos congresos sobre sismología tanto en España como en el extranjero y publicó con frecuencia artículos en las revistas *Ibérica* y *Toledo*, *Revista de Geofísica*, *Boletín de la Real Academia de Bellas Artes de Toledo* y *Toledo*. Para conservar la memoria de este insigne científico se le dio su nombre a los nuevos edificios levantados en unos terrenos cedidos por el conde de Romanones en la carretera de Ávila, a los que se trasladó el observatorio en 1933».

Epílogo

Cuando el académico José Rodríguez Mourelo realizó el elogio de Eduardo Mier y Miura, hizo un anuncio un tanto críptico, tratando de hacer ver que sus investigaciones no iban a ser del todo comprendidas por la comunidad científica más cercana. El anuncio resultó ser del todo cierto, a tenor de lo que se comenta en el documentado artículo del investigador Aitor Anduaga Egaña: *Earthquakes, Damage, and Prediction: the Spanish Seismological Service*⁷⁸, 1898-1930; publicado en *Earth Sciences*

⁷⁸ Así parece desprenderse del contenido de su resumen: La creación y desarrollo del Servicio Sismológico Español (1906-1930) ilustra claramente la complejidad de la organización de las redes sismológicas en España durante la Restauración y el reinado de Alfonso XIII. Una combinación única de avances técnicos, conocimiento sismológico y la necesidad de seguridad y predicción sísmica dio lugar al surgimiento de observatorios tanto estatales como privados, un aspecto importante del proceso de modernización científica posterior a la guerra hispanoamericana de 1898. Este artículo tiene como objetivo mostrar cómo el ingeniero Eduardo Mier y Miura (1858-1917) jugó un papel clave en la fundación del Servicio, a pesar de que algunas de sus decisiones y contribuciones fueron muy criticadas por la próxima generación de sismólogos. Figuras como Vicente Inglada, José Galbis y Alfonso Rey Pastor llevaron a cabo



S. Alexius Patronus contra terrae motus & elementum Terrae. Siglo XVIII

History 23 (2004), 175-207. Tras reconocer la influencia italiana en el diseño de la red de observatorios diseñada por Mier, se destaca también como predominó su faceta de instrumentista destacado sobre la de investigador. Inglada, el artífice del avance sismológico del Instituto fue especialmente crítico con aquel, llegando a afirmar que «pretender conseguir boletines científicos a través de los registros proporcionados por los sismógrafos toledanos (Wiechert y Agamenone) era como esperar buenos resultados al observar la red geodésica de tercer orden con una brújula⁷⁹». La comparación no fue nada casual, pues iba dirigida a concienciar sobre ese particular a la Dirección del Insti-

una completa reorganización del Servicio. Estos hechos no surgieron del conocido movimiento regeneracionista que tuvo lugar a principios de siglo, sino que fueron el resultado de dinámicas internas.

⁷⁹ Realmente se refería Inglada a la brújula topográfica o taquimétrica, cuyas lecturas angulares se efectuaban con incertidumbres próximas a los 15 minutos de arco; en cambio con los teodolitos empleados en las antiguas redes geodésicas de tercer orden se leían sus distancias angulares con incertidumbres de tan solo algunos segundos de arco.

tuto Geográfico, más versada en la geodesia que en la geofísica.

Lo que sí parece indubitable es que la sismología inició su andadura dentro del Instituto Geográfico de la mano de Eduardo Mier y Miura, en primer lugar, secundado por José Galbis Rodríguez, debiéndose a ambos la construcción de la red de Observatorios, presididos por el Central de Toledo, y la dotación de un instrumental de primer orden necesario para su correcto funcionamiento. Esa iniciativa resultaría crucial para la investigación sismológica tan sobresaliente que allí se llevó a cabo y que en ocasiones no es valorada en sus justos términos. Mucho más conocida es la pareja formada por Vicente Inglada Ors y por su brillante alumno Alfonso Rey Pastor, dos ingenieros geógrafos de proyección universal que encumbraron a la Sismología de España, situándola a un nivel envidiable para los sismólogos de otros países. El primer grupo estuvo quizás más anclado al pasado, por el tiempo en que se formaron, aunque sentaron las bases en que se apoyaron las fructíferas investigaciones por las que se caracterizó el segundo grupo.

MAPS & CRAFTS



www.mapsandcrafts.com

info@mapsandcrafts.com

*Nuestra pasión es la Cartografía
y la artesanía hecha con ella*

1. Información general

MAPPING es una revista técnico-científica que tiene como objetivo la difusión y enseñanza de la Geomática aplicada a las Ciencias de la Tierra. Ello significa que su contenido debe tener como tema principal la Geomática, entendida como el conjunto de ciencias donde se integran los medios para la captura, tratamiento, análisis, interpretación, difusión y almacenamiento de información geográfica y su utilización en el resto de Ciencias de la Tierra. Los trabajos deben tratar exclusivamente sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura de la revista.

Los trabajos deben ser originales e inéditos y no deben estar siendo considerados en otra revista o haber sido publicados con anterioridad. MAPPING recibe artículos en español y en inglés. Independientemente del idioma, todos los artículos deben contener el título, resumen y palabras claves en español e inglés.

Todos los trabajos seleccionados serán revisados por los miembros del Consejo de Redacción mediante el proceso de «Revisión por pares doble ciego».

Los trabajos se publicarán en la revista en formato papel (ISSN: 1131-9100) y en formato electrónico (eISSN: 2340-6542).

Los autores son los únicos responsables sobre las opiniones y afirmaciones expresadas en los trabajos publicados.

2. Tipos de trabajos

- **Artículos de investigación.** Artículo original de investigaciones teóricas o experimentales. La extensión no podrá ser superior a 8000 palabras incluyendo resumen, tablas y figuras, con un máximo de 40 referencias bibliográficas. Cada tabla o figura será equivalente a 100 palabras. Tendrá la siguiente estructura: título, resumen, palabras clave, texto (introducción, material y método, resultados, discusión y conclusiones), agradecimientos y bibliografía.
- **Artículos de revisión.** Artículo detallado donde se describe y recopila los desarrollos más recientes o trabajos publicados sobre un determinado tema. La extensión no podrá superar las 5000 palabras, incluyendo resumen, tablas y figuras, con un máximo de 25 referencias bibliográficas.
- **Informe técnico.** Informe sobre proyectos, procesos, productos, desarrollos o herramientas que no supongan investigación propia, pero que sí muestren datos técnicos interesantes y relevantes. La extensión máxima será de 3000 palabras.

3. Formato del artículo

El formato del artículo se debe ceñir a las normas ex-

puestas a continuación. Se recomienda el uso de la plantilla «**Plantilla Texto**» y «**Recomendaciones de estilo**». Ambos documentos se pueden descargar en la web de la revista.

- A. Título.** El título de los trabajos debe escribirse en castellano e inglés y debe ser explícito y preciso, reflejando sin lugar a equívocos su contenido. Si es necesario se puede añadir un subtítulo separado por un punto. Evitar el uso de fórmulas, abreviaturas o acrónimos.
- B. Datos de contacto.** Se debe incluir el nombre y 2 apellidos, la dirección el correo electrónico, el organismo o centro de trabajo. Para una comunicación fluida entre la dirección de la revista y las personas responsables de los trabajos se debe indicar la dirección completa y número de teléfono de la persona de contacto.
- C. Resumen.** El resumen debe ser en castellano e inglés con una extensión máxima de 200 palabras. Se debe describir de forma concisa los objetivos de la investigación, la metodología empleada, los resultados más destacados y las principales conclusiones.
- D. Palabras clave.** Se deben incluir de 5-10 palabras clave en castellano e inglés que identifiquen el contenido del trabajo para su inclusión en índices y bases de datos nacionales e internacionales. Se debe evitar términos demasiado generales que no permitan limitar adecuadamente la búsqueda.
- E. Texto del artículo de investigación.** La redacción debe ser clara y concisa con la extensión máxima indicada en el apartado «Tipos de trabajo». Todas las siglas citadas deben ser aclaradas en su significado. Para la numeración de los apartados y subapartados del artículo se deben utilizar cifras arábigas (1. Título apartado; 1.1. Título apartado; 1.1.1. Título apartado). La utilización de unidades de medida debe seguir la normativa del Sistema Internacional.

El contenido de los **artículos de investigación** puede dividirse en los siguientes apartados:

- **Introducción:** informa del propósito del trabajo, la importancia de éste y el conocimiento actual del tema, citando las contribuciones más relevantes en la materia. No se debe incluir datos o conclusiones del trabajo.
- **Material y método:** explica cómo se llevó a cabo la investigación, qué material se empleó, qué criterios se utilizaron para elegir el objeto del estudio y qué pasos se siguieron. Se debe describir la metodología empleada, la instrumentación y sistemática, tamaño de la muestra, métodos estadísticos y su justificación. Debe presentarse de la forma más conveniente para que el lector comprenda el desarrollo de la investigación.
- **Resultados:** pueden exponerse mediante texto, ta-

blas y figuras de forma breve y clara y una sola vez. Se debe resaltar las observaciones más importantes. Los resultados se deben expresar sin emitir juicios de valor ni sacar conclusiones.

- **Discusión:** en este apartado se compara el estudio realizado con otros que se hayan llevado a cabo sobre el tema, siempre y cuando sean comparables. No se debe repetir con detalle los datos o materiales ya comentados en otros apartados. Se pueden incluir recomendaciones y sugerencias para investigaciones futuras.

En algunas ocasiones se realiza un único apartado de resultados y discusión en el que al mismo tiempo que se presentan los resultados se va discutiendo, comentando o comparando con otros estudios.

- **Conclusiones:** puede realizarse una numeración de las conclusiones o una recapitulación breve del contenido del artículo, con las contribuciones más importantes y posibles aplicaciones. No se trata de aportar nuevas ideas que no aparecen en apartados anteriores, sino recopilar lo indicado en los apartados de resultados y discusión.
- **Agradecimientos:** se recomienda a los autores indicar de forma explícita la fuente de financiación de la investigación. También se debe agradecer la colaboración de personas que hayan contribuido de forma sustancial al estudio, pero que no lleguen a tener la calificación de autor.
- **Bibliografía:** debe reducirse a la indispensable que tenga relación directa con el trabajo y que sean recientes, preferentemente que no sean superiores a 10 años, salvo que tengan una relevancia histórica o que ese trabajo o el autor del mismo sean un referente en ese campo. Deben evitarse los comentarios extensos sobre las referencias mencionadas.
Para citar fuentes bibliográficas en el texto y para elaborar la lista de referencias se debe utilizar el formato APA (*American Psychological Association*). Se debe indicar el DOI (*Digital Object Identifier*) de cada referencia si lo tuviera. Utilizar como modelo el documento «**Como citar bibliografía**» incluido en la web de la revista. La exactitud de las referencias bibliográficas es responsabilidad del autor.
- **Currículum:** se debe incluir un breve Currículum de cada uno de los autores lo más relacionado con el artículo presentado y con una extensión máxima de 200 palabras.

En los **artículos de revisión e informes técnicos** se debe incluir título, datos de contacto, resumen y palabras claves, quedando el resto de apartados a consideración de los autores.

F. Tablas, figuras y fotografías. Se deben incluir solo tablas y figuras que sean realmente útiles, claras y representativas. Se deben numerar correlativamente según la cita en el texto. Cada figura debe tener su pie explicativo, indicándose el lugar aproximado de colocación de las mismas. Las tablas y figuras se deben enviar en ficheros aparte, a ser posible en fichero comprimido. Las fotografías deben enviarse en formato JPEG o TIFF, las gráficas en EPS o PDF y las tablas en Word, Excel u Open Office. Las fotografías y figuras deben ser diseñadas con una resolución mínima de 300 pixel por pulgada (ppp).

G. Fórmulas y expresiones matemáticas. Debe perseguirse la máxima claridad de escritura, procurando emplear las formas más reducidas o que ocupen menos espacio. En el texto se deben numerar entre corchetes. Utilizar editores de fórmulas o incluirlas como imagen.

4. Envío

Los trabajos originales se deben remitir preferentemente a través de la página web <http://www.revista-mapping.com> en el apartado «OJS», o mediante correo electrónico a info@revistamapping.com. El formato de los ficheros puede ser Microsoft Word u Open Office y las figuras vendrán numeradas en un archivo comprimido aparte.

Se debe enviar además una copia en formato PDF con las figuras, tablas y fórmulas insertadas en el lugar más idóneo.

5. Proceso editorial y aceptación

Los artículos recibidos serán sometidos al Consejo de Redacción mediante «**Revisión por pares doble ciego**» y siguiendo el protocolo establecido en el documento «**Modelo de revisión de evaluadores**» que se puede consultar en la web.

El resultado de la evaluación será comunicado a los autores manteniendo el anonimato del revisor. Los trabajos que sean revisados y considerados para su publicación previa modificación, deben ser devueltos en un plazo de 30 días naturales, tanto si se solicitan correcciones menores como mayores.

La dirección de la revista se reserva el derecho de aceptar o rechazar los artículos para su publicación, así como el introducir modificaciones de estilo comprometiéndose a respetar el contenido original.

Se entregará a todos los autores, dentro del territorio nacional, la revista en formato PDF mediante enlace descargable y 1 ejemplar en formato papel. A los autores de fuera de España se les enviará la revista completa en formato electrónico mediante enlace descargable.

Suscripción a la revista MAPPING

Subscriptions and orders

Datos del suscriptor / Customer details:

Nombre y Apellidos / Name and Surname: _____
Razón Social / Company or Institution name: _____ NIF-CIF / VAT Number: _____
Dirección / Street address: _____ CP / Postal Code: _____
Localidad / Town, City: _____ Provincia / Province: _____
País - Estado / Country - State: _____ Teléfono / Phone: _____
Móvil / Mobile: _____ Fax / Fax: _____
e-mail: _____ Fecha / Order date: ____/____/____

PAPEL

SUSCRIPCIÓN ANUAL / SUBSCRIPTION:

- España / Spain : 60€
- Europa / Europe: 90€
- Resto de Países / International: 120€

Precios de suscripción por año completo 2022 (6 números por año) *Prices year 2022 (6 issues per year)*

NÚMEROS SUELTOS / SEPARATE ISSUES:

- España / Spain : 15€
- Europa / Europe: 22€
- Resto de Países / International: 35€

Los anteriores precios incluyen el IVA. Solamente para España y países de la UE *The above prices include TAX Only Spain and EU countries*

DIGITAL

SUSCRIPCIÓN ANUAL / ANNUAL SUBSCRIPTION:

- Internacional / International : 25€

Precios de suscripción por año completo 2022 (6 números por año) en formato DIGITAL y enviado por correo electrónico / *Prices year 2022 (6 issues per year)*

NÚMEROS SUELTOS / SEPARATE ISSUES:

- Internacional / International : 8€

Los anteriores precios incluyen el IVA. Solamente para España y países de la UE *The above prices include TAX Only Spain and EU countries*

Forma de pago / Payment:

Transferencia a favor de eGeoMapping S.L.

Bank transfer in favor of eGeoMapping S.L.

Distribución y venta / Distribution and sale:

Departamento de Publicaciones de eGeoMapping S.L.

C/ Arrastaria 21. 28022-Madrid

Tels: (+34) 91 006 72 23; (+34) 655 95 98 69

e-mail: info@revistamapping.com

www.revistamapping.com

Firma _____

CONTIGO TODO EL CAMINO



PLANIFICACIÓN > PROSPECCIÓN > DISEÑO > ORGANIZACIÓN > EJECUCIÓN > INSPECCIÓN

Sea cual sea el tipo de proyecto, el tamaño de su empresa o la aplicación específica, ponemos a su disposición una amplia gama de soluciones de medición y posicionamiento de precisión para satisfacer sus necesidades.

Descubra lo que otros profesionales como usted están logrando con la tecnología de Topcon.

topconpositioning.com/es-es/insights

MINISTERIO DE TRANSPORTE, MOVILIDAD Y AGENDA URBANA
INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL
CENTRO NACIONAL DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

cartografía digital



Oficina central y comercialización:
General Ibáñez de Ibero, 3 • 28003 MADRID
Teléfono: +34 91 597 94 15 • Fax: +34 91 553 29 13
e-mail: consulta@cnig.es

CENTRO DE DESCARGAS DE DATOS

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

BASE CARTOGRÁFICA NUMÉRICA (BCN 1000, 50, 200, 25),

MAPA TOPOGRÁFICO NACIONAL (MTN50,25),

MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MDT1000, 200, 25),

LÍNEAS LÍMITE, BASE DE DATOS DE POBLACIÓN, MAPA DE USOS DEL SUELO,

ATLAS NACIONAL DE ESPAÑA, CARTOGRAFÍA TEMÁTICA.