

Vigilancia

■ Texto: EMILIO CARREÑO HERRERO y ALFONSO VILLAMAYOR RODRIGUEZ. Red Sísmica Nacional.

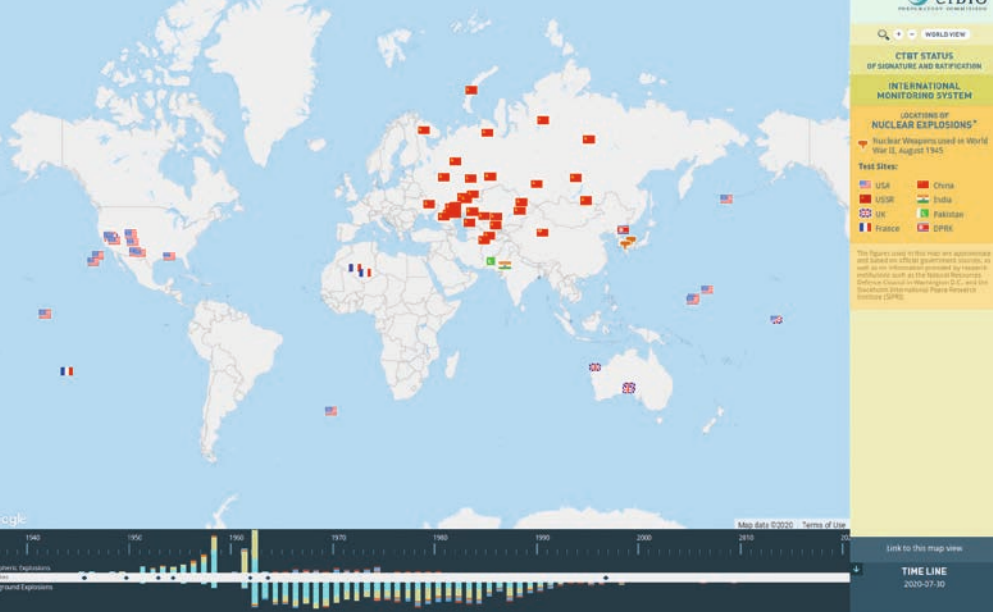


Aportación de España a través del Mitma:
el Centro Sismológico de Sonseca

La vigilancia de los ensayos nucleares

La aportación de España a la Organización del Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares (CTBTO) se está realizando, en gran medida, a través del Centro Sismológico de Sonseca (Toledo), en la Estación Sísmica Primaria del Sistema Internacional de Vigilancia de dichas pruebas, perteneciente a la Red Sísmica Nacional (RSN), adscrita al Instituto Geográfico Nacional (IGN). Esta estación realiza el seguimiento en tiempo real de cualquier evento que se pudiera producir en la corteza terrestre.





Explosiones nucleares en el mundo desde 1945, según la CTBTO. <https://www.ctbto.org/specials/who-we-are/>

¿Qué es el Tratado de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares?

La Conferencia de Desarme, único foro negociador de acuerdos multilaterales de desarme, tras 24 años de existencia, aún no ha conseguido iniciar las negociaciones sobre un tratado para el cese de la producción de materiales fisibles para armas nucleares u otros artefactos explosivos nucleares.

A pesar de la oposición de alguno de los países de la comunidad internacional, ya en 1957, la Asamblea General de Naciones Unidas adoptó su primera resolución en la que se nombra de manera explícita un tratado para el cese de producción de material fisible. Pero no fue hasta 1963 cuando el Reino Unido, la antigua Unión Soviética y los EE. UU. acordaron el Tratado de Prohibición Parcial de Ensayos Nucleares para impedir la realización de ensayos nucleares en la atmósfera, sobre la superficie terrestre o sobre el lecho marino.

La localización de los ensayos nucleares ha sido muy diversa y se han producido tanto en la atmósfera, como bajo el agua y la tierra. La evolución de estos ensayos está muy relacionada con la situación geopolítica y

estratégica mundial, tanto del siglo pasado como en la de éste. En la actualidad se han confirmado la realización de al menos 2.058 pruebas nucleares.

El Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (CTBT) es un acuerdo internacional para prohibir todo tipo de explosiones nucleares (incluidas las armas nucleares) en cualquier entorno. Fue aprobado por la Asamblea General de las Naciones Unidas, el 10 de septiembre de 1996, y quedó abierto a la firma de todos los Estados, el 24 de septiembre de 1996. Su entrada en vigor será 180 días después de la fecha en que hayan depositado todos los Estados enumerados en el anexo 2 del Tratado. En la actualidad ha sido firmado por 183 Estados, de los cuales 164 ya lo han ratificado, haciéndolo España en 1998.

Para su entrada en vigor, el tratado debe además ser firmado y ratificado por los 44 países que en 1996 poseían reactores nucleares en operación o experiencia reconocida en la tecnología nuclear. A día de hoy, 3 de estos países aún no lo han firmado (Irán, Pakistán y República Democrática de Corea) y otros 5 no lo han ratificado (EE. UU., Egipto, Israel, Irán y China).

El texto sobre el establecimiento de una Comisión Preparatoria (CP) de la CTBT fue aprobado el 19 de noviembre de 1996, en una reunión de los Estados signatarios convocada por el Secretario General de las Naciones Unidas en su calidad de depositario del Tratado. La CP de la CTBTO es la organización que tiene como objetivo desarrollar los términos del Tratado hasta su entrada en vigor. Con sede en Viena (Austria), la CP cuenta con un plenario, compuesto por todos los Estados que han firmado el Tratado, y de una Secretaría Técnica Provisional (PTS) que ejecuta las decisiones de éste.

Uno de los objetivos principales de la CP es establecer un régimen de verificación global capaz de detectar explosiones nucleares subterráneas, submarinas o atmosféricas para conseguir la confianza mutua entre las naciones.

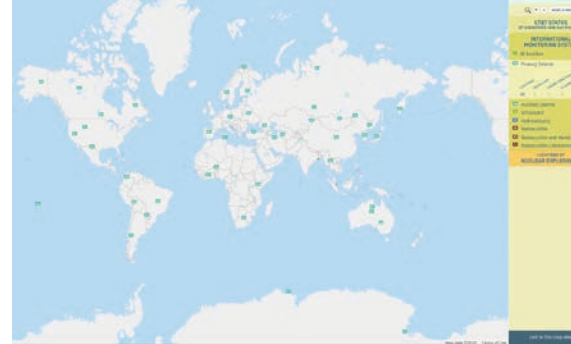
El régimen de verificación del CTBT posee unas capacidades técnicas y científicas sin precedentes. Se basa en un Sistema Internacional de Vigilancia (IMS) apoyado en cuatro tecnologías de detección (sísmica, hidroacústica, infrasónica y de radionucleidos). Los datos registrados en las estaciones son recogidos y enviados práctica-

mente en tiempo real al Centro Internacional de Datos (IDC) a través de la Infraestructura Global de Comunicaciones (GCI) que cuenta con cinco satélites geoestacionarios en uso exclusivo. El IDC también tiene su sede en Viena y su misión es recibir, procesar, analizar, informar y archivar los datos del IMS y los laboratorios asociados, proporcionando a los Estados miembros acceso a los datos y a los productos elaborados con ellos, como informes o boletines.

Participación del Instituto Geográfico Nacional en el IMS

El IMS es una red de detectores establecidos por la CP para que los Estados signatarios puedan verificar en todo momento el cumplimiento del CTBT en cualquier lugar del mundo. Compuesto por 321 estaciones con cuatro tecnologías distintas, el IMS proporciona una cobertura uniforme del planeta que permite detectar una explosión nuclear en cualquier ubicación de la Tierra, ya sea atmosférica, subterránea o submarina. Algunas estaciones están situadas en localizaciones remotas con acceso complicado que dificultan su mantenimiento, lo que es tenido en cuenta desde el diseño conceptual para extender en lo posible la vida útil de cada estación. Las estaciones son certificadas cuando se cumplen todas las especificaciones técnicas de detección, operación, autenticación y comunicación con el IDC. Las tecnologías, sísmica, infrasónica e hidroacústica (SIH) o de forma de onda, se usan para detectar la energía liberada en una explosión nuclear o en un suceso natural en la litosfera, atmósfera o hidrosfera:

- La Red sísmica cuenta con 50 estaciones primarias que envían continuamente datos en tiempo real al IDC. Además, una red auxiliar de otras 120 estaciones, puede enviar su información a petición del IDC. Las estaciones sísmicas pueden ser de tres componentes o de malla. La estación sismológica de Sonseca (Toledo) es una de las estaciones primarias más importantes del sistema.
- La Red hidroacústica detecta las ondas sonoras producidas en los océanos. Debido a la elevada eficiencia de la propagación del sonido en el agua, bastan 11 estaciones para vigilar la hidrosfera, que supone el 70 % de la superficie terrestre. Seis de las estaciones son hidrofónicas (micrófonos submarinos) y cinco son de fase T, que en realidad son estaciones sísmicas que detectan la llegada de las ondas sonoras del mar a la costa y su conversión en evento sísmico.
- La Red infrasónica cuenta con 60 estaciones que emplean microbarómetros para detectar ondas de sonido de muy baja frecuencia. Las redes SIH son muy sensibles y proporcionan información casi inmediata al IDC. El problema es que también detectan fenómenos que no están relacionados con las explosiones nucleares y que pueden ser tanto naturales (terremotos, explosiones volcánicas o grandes movimientos migratorios de animales) como artificiales (explosiones no nucleares, accidentes aéreos, lanzamiento y reentrada de naves espaciales). En consecuencia, los datos de las redes SIH no constituyen



Estaciones sísmicas primarias del IMS.



Traslado de instrumentación hidroacústica para su instalación en Wake Island (Océano Pacífico Norte).



Estación infrasónica en Groenlandia.



Estación de detección de radionúclidos. RN15, Resolute (Canadá).

una prueba concluyente sobre el carácter nuclear de una explosión, siendo necesario utilizar los datos de las estaciones de radionucleidos para confirmar que ha habido una explosión nuclear.

Las capacidades de detección del IMS no tendrían valor en su objetivo, de verificar el cumplimiento del CTBT, si la información que se consigue en las estaciones no fuera debidamente transmitida lo antes posible a los estados signatarios. Esto se consigue mediante la Infraestructura Global de Comunicaciones (GCI), que cuenta con una red de cinco satélites geoestacionarios para la transmisión de datos desde las estaciones del IMS al IDC en Viena, desde donde se transmiten a los Estados signatarios los datos y productos elaborados por los expertos. Estos Estados signatarios pueden desarrollar Centros Nacionales de Datos (NDC) para la recepción sistemática de cualquier información del IMS y efectuar sus propios análisis independientes de la misma. En el caso de España el NDC reside en la sede central del IGN.

El análisis de los datos en el Centro Sismológico de Sonseca

El análisis de un evento se puede realizar mediante dos procesos que ofrecen información complementaria, uno de ellos basado en el dominio del tiempo y el otro en el dominio de la frecuencia. En general, la localización, profundidad, hora origen y la magnitud asimilada al evento, se determina a través del registro en tiempo real de las estaciones sísmicas que componen RSN y que en la actualidad son 117 estaciones. A estas y dependiendo de la situación del epicentro del evento, se le añaden estaciones de otras redes.

El estudio en el dominio de la frecuencia del espectro de potencia registrado da información, a través de los diagramas frecuencia-número de onda, sobre las diferentes velocidades y diferentes direcciones de llegada. La Estación Sismológica de Sonseca (Toledo) fue originalmente establecida en 1958 por las Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos de América (Air Force Technical Application Center, AFTAC). Esta estación

Es una de las estaciones más interesantes de Europa por su situación y por su resolución en zonas de realización de pruebas nucleares

formaba parte de una red de estaciones sísmicas diseñadas a nivel mundial con el propósito de registrar y analizar señales que pudieran provenir tanto de terremotos como de fuentes no naturales, y así realizar una vigilancia y localización de la ocurrencia de explosiones nucleares. Su establecimiento en Sonseca fue posible gracias a un acuerdo clasificado entre el Reino de España y el Gobierno de los Estados Unidos, siendo su uso prácticamente desconocido en medios científicos de nuestro país hasta comienzo de los años 90.

Sonseca, por su situación geográfica, es una de las estaciones más interesantes de

Sala de control de la Estación Sismológica de Sonseca (a la izquierda) y Estación de campo situada a dos km del centro de recepción de datos de Sonseca (a la derecha).





Centro Nacional de Datos (NDC) en la sede del IGN en Madrid.

Europa, así como por sus resoluciones referentes a las zonas conocidas de realización pasada o presente de pruebas nucleares en: Nueva Zembla, Argelia, Nevada Test Site, Rajasthan y República Democrática de Corea.

Los elementos de control de la estación de Sonseca se encuentran ubicados en la proximidad del pueblo del mismo nombre, en la provincia de Toledo. El centro tiene una extensión aproximada de 5.000 m² y consta de un total de 5 edificios utilizados para hospedar el centro de recepción de datos, las salas de mantenimiento y el almacén de repuestos. La estación de Sonseca respecto al diseño de su instrumentación puede clasificarse como un

array telesísmico. Está formada por 19 sensores sísmicos de corto periodo y componente vertical, distribuidos en un área de unos 80 km² con una apertura (distancia máxima entre ellos) de 10 km y un diseño en forma de hélice irregular. Además, posee una estación central de banda ancha de tres componentes. Siendo todas estas estaciones digitales. En la sede del IGN en Madrid, que es el NDC para España, se recibe en tiempo real la señal de todos los sensores de Sonseca. Allí se procede a su adquisición y procesamiento mediante un sistema de localización automático. Este sistema realiza las labores de detección de fase y extracción de parámetros (tiempo,

azimut, velocidad aparente, amplitud, periodo, frecuencia), que permite realizar asignación de fase, agrupamiento de fases y declaración de evento, y por último una localización automática. Es decir, en caso de registro de un sismo, únicamente con los datos de Sonseca, se obtienen un azimut y una distancia provisionales que facilitan el cálculo posterior preciso de los parámetros del sismo con el resto de la red en décimas de segundo. En la actualidad, la Estación Sismológica de Sonseca, está certificada como *Estación Primaria del IMS* de la CTBTO, desde noviembre de 2001. Desde 2015, la Estación Sismológica de Sonseca también constituye el Centro de Respaldo de

Ensayos nucleares reales y de preparación.....

Desde la creación de la CTBTO, se han venido realizando ejercicios a nivel mundial para probar la capacidad del sistema en la detección de pruebas nucleares. España ha participado activamente, consiguiendo resultados extraordinarios, situándose siempre entre los primeros lugares del mundo. En la actualidad se realizan los llamados *NDCs Preparedness Exercises*, *NPEs*, que son ejercicios de preparación de los Centros Nacionales de Datos, consistentes en la simulación de una violación ficticia del CTBT con objeto de incrementar la conciencia y preparación de las tareas que tienen encomendadas. Estos ejercicios están destinados a ayudar a evaluar la efectividad de los procedimientos aplicados en los NDCs, así como la calidad, integridad y utilidad de los productos del IDC. Los NPEs realizados en ediciones anteriores han demostrado ser una herramienta indicativa eficiente para probar el rendimiento del sistema de verificación y de sus elementos. A partir de los datos procedentes de las redes en forma de onda (sísmica, de infrasonidos e hidroacústica) del IMS, la CTBTO recibe información prácticamente en tiempo real de explosiones que pueden haber sido generadas por

el hombre pero que podrán ser solo clasificadas como nucleares una vez se hayan detectado los aerosoles radiactivos correspondientes. Como ejemplo se muestra el evento acaecido en la República Democrática de Corea en el año 2013. A partir de los datos sismológicos, se han localizado los lugares donde se realizaron los ensayos y definido la elipse con un error de $\pm 9,1$ km o 214 km².

Ensayo del 12 de febrero de 2013

Como indica la propia organización: *El 12 de febrero fue detectado inmediatamente un evento en Corea del Norte de manera fidedigna y precisa en 94 estaciones sísmicas y 2 estaciones de infrasonidos del sistema de vigilancia internacional de la CTBTO. Los primeros datos estuvieron a disposición de los Estados miembros de la CTBTO en menos de 1 h y antes del anuncio por parte de Corea del Norte de la realización de un ensayo nuclear.*

El 23 de abril de 2013 la CTBTO confirmó y publicó la detección de gases nobles en su red de estaciones de radionucleidos, indicando que dichos positivos podrían estar relacionados con la información comunicada por la República

Democrática de Corea que había realizado ensayos nucleares el 12 de febrero de 2013.

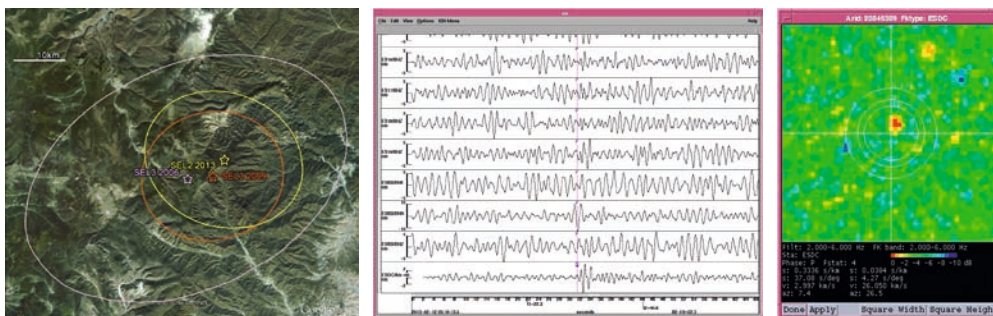
Los datos registrados que se muestran en la figura siguiente son los recogidos por las estaciones del *array* de Sonseca de la prueba nuclear de 12 de febrero de 2013.

Para esa prueba y en ese año, la localización era muy difícil por la debilidad de la señal. La explosión está prácticamente en la zona de sombra para el *array* de Sonseca. En relación con la señal obtenida de este suceso en la figura se muestra el análisis frecuencia-número de onda para este evento. A partir del análisis de las señales obtenidas es posible determinar los datos siguientes:

- Lentitud (inversa de la velocidad): 0.0384 s·km⁻¹
- Velocidad aparente: 26.05 km·s⁻¹
- Azimut: $26^{\circ}.5$

Es importante indicar que esta prueba se detectó en 94 estaciones sísmicas de CTBTO, determinándose que la hora origen: $02^{\text{h}} 57^{\text{m}} 51^{\text{s}}$ UTC y una magnitud de 5.0. La localización por el IMS se realizó finalmente con 25 estaciones y un error de ± 16.2 km, y fue la siguiente:

- Latitud: $41^{\circ}.313\text{N}$
- Longitud: $129^{\circ}.101\text{E}$



01. Zona de ensayos nucleares utilizada por la República Democrática de Corea. La figura muestra los epicentros de los ensayos de 2006, 2009 y 2013. **02.** Registro en la Estación Sismológica de Sonseca de la prueba nuclear de República Democrática de Corea de 12 de febrero de 2013. **03.** Diagrama frecuencia-número de onda para la prueba nuclear de 12 de febrero de 2013.



Visita del Secretario Ejecutivo de la CTBTO, Dr. Lassina Zerbo, al Centro Sismológico de Sonseca, junto al director de la Red Sísmica Nacional, Emilio Carreño, y el jefe del centro, Alfonso Villamayor, en noviembre de 2018.

efectividad en el cumplimiento del Tratado. Para tal cometido, cuenta con un amplio abanico de tecnologías de verificación del IMS, datos y productos del IDC. En consecuencia, ofrece un alto potencial a los Estados miembros, quienes pueden emplear dichos recursos para otras aplicaciones civiles o científicas, contribuyendo al desarrollo sostenible de la seguridad del ser humano y del medioambiente. Las aplicaciones civiles que se presentarían como beneficiosas para los Estados miembros pertenecientes al CTBT serían, por ejemplo, el empleo de las estaciones de vigilancia sísmica para monitorizar los posibles terremotos o eventos vulcanológicos. Lo mismo ocurriría con los tsunamis y la vigilancia hidroacústica, la vigilancia infrasónica y observación de meteoritos y de los desastres radiológicos por parte de las estaciones de vigilancia de radionucleidos. ■

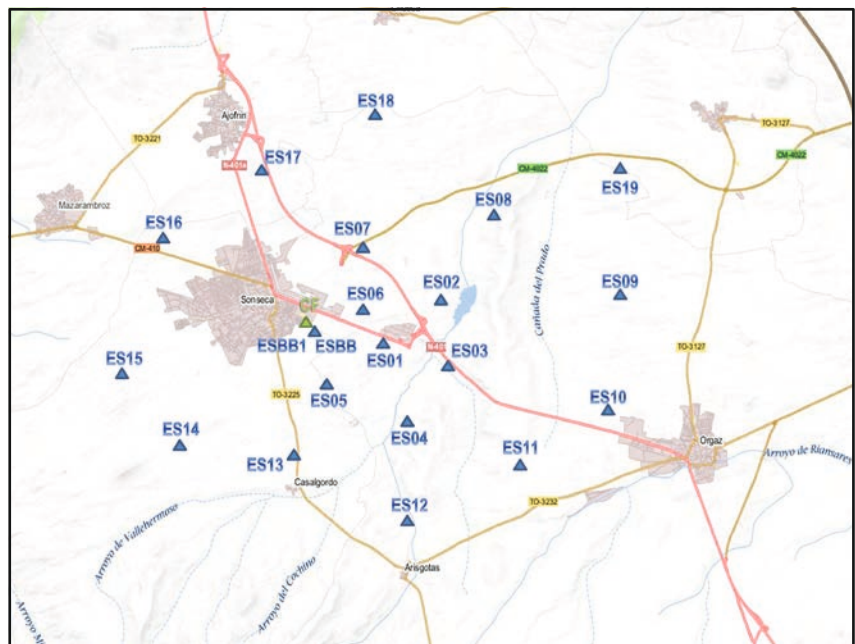
la RSN, de manera que, en caso de pérdida de las señales de vigilancia sísmica en España, la Estación funciona automáticamente para alertas sísmicas y del Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis.

El procedimiento analógico de análisis de las señales procedentes de explosiones, que se lleva a cabo a través de los datos registrados en la estación de Sonseca, se basa en que el valor del retardo temporal (la diferencia en tiempo con el que se registran la señal sísmica en los diferentes sensores) depende de la dirección del frente de onda (ángulo con el que se recibe la señal sísmica en los diferentes sensores). La idea consiste en la mejora de la relación señal-ruido mediante técnicas de análisis ya usadas en radioastronomía, radar, acústica o sonar. La estación debe estar formada por 3 o más sensores (1, o, 3 componentes), una apertura o distancia máxima entre estaciones no superior a los 100 km, instrumentación uniforme y tiempo común, un centro de

recepción de datos en tiempo real y un registro individual de los canales de datos para su posterior procesamiento.

Aprovechamiento del sistema de vigilancia en otros ámbitos

El propósito primario de la CTBTO es la verificación y la



Configuración del array de Sonseca.