



25 AÑOS DE LA RED DE INVESTIGACIÓN SOBRE BÓLIDOS Y METEORITOS: HITOS Y OBJETIVOS FUTUROS

La Red de Investigación sobre Bólid​os y Meteoritos (SPMN) surge en 1997 en el marco de la primera tesis doctoral centrada en el estudio del fenómeno meteórico que fue defendida en 2002. Inicialmente promovida por los implicados en aquel hito, Josep M. Trigo y sus directores de tesis, los Dres. Jordi Llorca y Juan Fabregat. La actividad divulgativa desarrollada por el primero en el Planetari de Castelló permitió establecer contactos entre la comunidad de astrónomos profesionales y aficionados que sentarían las bases de los primeros nodos activos en torno a 1996. A partir de ahí comenzaron colaboraciones con otros investigadores (los Dres. Alberto J. Castro-Tirado, José Á. Docobo y José L. Ortiz), que hacen que se crease en el año 2000 una página web en la Universitat Jaume I. Entre 2003 y 2005 hubo un periodo intenso de colaboración entre los nodos, ocurriendo la caída el 4 de enero de 2004 de la condrita Villalbeto de la Peña en Palencia. Ese caso supuso un aliciente extraordinario y los resultados científicos supusieron la primera recuperación y caracterización de un meteorito en 57 años y la novena órbita de un meteorito en todo el mundo.

Por aquel entonces, las técnicas aplicadas por los integrantes de

la Red SPMN y las colaboraciones a nivel internacional lograron detecciones de grandes bólidos que permitieron descubrir que los asteroides próximos a la Tierra producían también meteoritos. Justo en ese año 2007 se organizó en Barcelona el congreso internacional *Meteoroids 2007* en el que los miembros de la Red SPMN presentaron a la comunidad científica no solo su primer meteorito recuperado (la condrita L6 Villalbeto de la Peña) sino también otros dos hitos relevantes. Por un lado, el desarrollo de cámaras *all-sky* y su aplicación al estudio de meteoros y bólidos, así como la aplicación pionera de sistemas de vídeo-detección al cálculo de órbitas de meteoroides. Ese mismo 2008 se incorporan a la red los Dres. Víctor Lanchares y Jaime Zamorano al mismo tiempo que se estudiaba la caída del segundo meteorito recuperado en 2007: la eucrita Puerto Lápice. El estudio de ese meteorito, proveniente del asteroide Vesta, incentivó la colaboración científica. Un par de años después se incorporaría a la red una geofísica interesada en la aplicación de los datos sísmicos al estudio de bólidos, la Dra. Mar Tapia.

En esta última década se han ido obteniendo resultados de gran impacto, por ejemplo, cuarenta artículos de investigación



FIGURA 1. Estaciones actuales de la Red SPMN. (Todas las imágenes son cortesía de los autores)

arbitrados, mayoritariamente en el primer cuartil y cinco libros publicados. Además, los diversos grupos han ido financiando con proyectos de investigación muchos nodos de detección. En este tiempo se ha establecido una coordinación del enorme volumen de datos que se genera a través de una lista de correo auspiciada en Red Iris y una base de datos en el ICE (CSIC/IEEC). De hecho, en ese centro desde 2006 se han defendido tres tesis doctorales directamente relacionadas con las investigaciones de la red SPMN que, al mismo tiempo, han permitido desarrollar nuevas técnicas de cuantificación del peligro de impacto por meteoroides y pequeños asteroides. Precisamente uno de esos doctorandos, el Dr. Moreno-Ibáñez se acaba de incorporar a la red SPMN.

RESULTADOS RECIENTES: NUEVO SOFTWARE DE DETECCIÓN 3D-FIRETOC

En los últimos años han surgido nuevos retos asociados con el incremento exponencial del volumen de datos, la existencia de diversos sistemas de detección que influyen en su heterogeneidad y, finalmente, su reducción astrométrica que hasta hace poco era prácticamente manual. Eso conllevaba un número elevado de tareas manuales convirtiéndolo en un proceso lento y tedioso que creaba un auténtico cuello de botella. Con el avance en el desarrollo de la visión artificial y las bases de datos, se ha abierto la oportunidad de automatizar todo el proceso: desde la detección, grabación y catalogación de los eventos hasta la extracción precisa de la trayectoria de los meteoroides. En este sentido, en el marco de un trabajo final de máster de Eloy Peña-Asensio, comenzamos en 2019 el desarrollo de un paquete de software escrito en Python llamado *3D-FireTOC* (*3D Fireball Trajectory and Orbit Calculator*). Un código capaz de automatizar la detección y análisis de bolas de fuego produciendo además una representación realista en 3D.

El proceso comienza por la captura en vídeo de un evento meteórico. El primer paso es detectar el movimiento del bólido a lo largo de la grabación. Esto se consigue evaluando la variación de los píxeles con respecto a un fotograma de referencia. En su entrada en la atmósfera a hipervelocidad, los meteoroides sufren un intenso proceso de ablación produciendo fuertes ful-

guraciones. Estos estallidos luminosos pueden saturar los píxeles y reflejar destellos, dificultando la detección e incluso generando falsos positivos. Por ello, se han elaborado dos métodos para evitar estos posibles errores: 1) una predicción en tiempo real de la siguiente posición del bólido para acotar el área de búsqueda y 2) un post-procesamiento para descartar puntos inconsistentes con una trayectoria más o menos recta y continua.

El segundo paso consiste en realizar la astrometría de las estrellas captadas. Se eligen los fotogramas donde no aparezca el bólido para poder medir correctamente la posición y luminosidad de las estrellas. Los fotogramas elegidos se superponen y se procesan reduciendo el ruido y resaltando las estrellas de referencia. Utilizando un catálogo estelar se coteja cada una de las estrellas identificadas. Teniendo la posición en la imagen de cada estrella y su posición en el cielo, es posible mediante métodos iterativos ajustar una matriz de transformación que convierta píxeles en coordenadas reales considerando también la distorsión producida por la lente. De esta manera se obtiene para cada punto de observación una trayectoria aparente sobre el cielo tal y cómo fue vista desde esa localización.

Dado que estas trayectorias aparentes son proyecciones sobre la bóveda celeste del camino recorrido por el meteoroides en la atmósfera, es necesario combinar dos o más observaciones para triangular la posición real del bólido. Esto se consigue utilizando el método de intersección de pla-

nos desarrollada por Znedek Cepelch en 1987. Para cada punto de observación se genera un plano medio que contenga la estación y la trayectoria aparente minimizando el error. Fruto de la intersección de cada uno de los planos generados, se obtiene una recta por la que debe haber pasado la trayectoria del bólido. Esto es posible ya que el vuelo atmosférico de un meteoroides define prácticamente una línea recta perfecta debido a su hipervelocidad. Finalmente, para calcular los parámetros orbitales de la órbita heliocéntrica de procedencia, es necesario primero calcular el radiante, esto es, la posición en el cielo de la que parece provenir el bólido. Esto se consigue propagando hacia atrás la trayectoria atmosférica hasta colisionar con la bóveda celeste, o de manera equivalente, intersectando los círculos mayores que contienen a las trayectorias aparentes. Es necesario además tener en cuenta el movimiento de rotación de la Tierra y la atracción gravitatoria que esta produce sobre el meteoroides. Una vez realizadas estas consideraciones, se obtiene la órbita en el Sistema Solar de su cuerpo progenitor.

La automatización del proceso de detección y análisis de bólidos facilita el estudio de riesgo de impacto, y permitirá la preparación inmediata de campañas de búsqueda de meteoritos recién caídos.

FUTUROS OBJETIVOS

Tras el largo camino recorrido juntos, tanto los profesionales como los aficionados involucrados en la Red SPMN, tenemos el re-

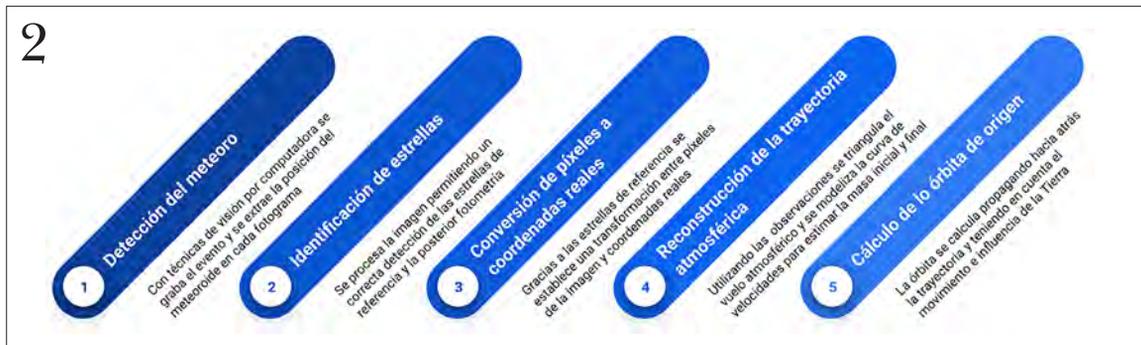


FIGURA 2. Pasos del software 3D-FireTOC.

to de seguir colaborando para fomentar el estudio de la materia interplanetaria y la meteorítica. Podemos identificar, entre nuestros futuros objetivos:

1. Reconstrucción de trayectorias y órbitas de bólidos automatizada, controlando el mantenimiento de una base de datos de órbitas de meteoroides que permita la búsqueda automatizada con sus cuerpos progenitores.

2. Como principal objetivo científico de nuestra red, utilizar esa base de datos para identificar posibles caídas de meteoritos. Aunar esfuerzos en la recuperación y caracterización de meteoritos. Los éxitos conseguidos con Villalbeto de la Peña, Puerto Lápice y la identificación de Ardón y Barcelona deben de animarnos en este nuevo reto.

3. En paralelo al punto anterior, cabe involucrar a los diversos actores en ese proceso de búsquedas de meteoritos, enfatizando que son patrimonio geológico y deben ser estudiados por nuestros equipos de investigación y preservados en nuestros museos. Esa debería ser nuestra motivación y prioridad.

4. Profundizar en aquellas técnicas que permiten profundizar en la naturaleza y la magnitud del peligro de impacto por pequeños asteroides.

CONCLUSIONES

La red SPMN implica a una decena de investigadores profesionales y un selecto grupo de aficionados, auténticos entusiastas del fenómeno meteórico. Aunque nos hayamos sumado al proyecto antes o después, todos nos sentimos interpelados con la necesidad de estudiar y dar respuesta racional al fenómeno meteórico. Además, coincidimos en que los resultados obtenidos a lo largo de estos 25 años hacen que la labor ingente que supone controlar el firmamento desde una treintena de estaciones en la Península Ibérica, islas Baleares y Canarias merezca la pena. Nuestra red fue uno de los primeros ejemplos de colaboración Pro-Am en el estado español y sigue ejemplificando que los astrónomos amateur pueden dar apoyo a empresas científicas lideradas con compromiso por profesionales, maximizando la cobertura de la red y su potencialidad para estudiar el origen de grandes bólidos, así como recuperar y caracterizar nuevos meteoritos. (A)

Eloy Peña Asensio^{1,2,3}, Josep M. Trigo Rodríguez^{1,3}, Jaime Izquierdo⁴, Jaime Zamorano⁴, Jordi Llorca⁵, Joan Montanyà⁵, Oscar van der Velde⁵, Alberto Castro-Tirado⁶, José L. Ortiz⁶, Manuel Moreno-Ibáñez⁷, José Á. Docobo⁸, Pedro Pablo Campo⁸, Manuel Andrade⁸, Jacinto Alonso-Azcárate⁹, Juan Fabregat¹⁰, Estefanía Blanch¹¹, David Altadill¹¹, Miguel Chioare Díaz¹², Ramón Iglesias Martín¹², Agustín Núñez¹³, Víctor Lanchares¹⁴, Alejandro Sánchez de Miguel¹⁵, Francisco Ocaña González^{1,16}, José A. de los Reyes, Sensi Pastor, Pep Pujols, Antonio Lasala, Diego Rodríguez, Amado Carbonell, Angel Pérez Navarro, Antonio Fernández Sánchez, Antonio J. Robles, Armand Oliva, Carlos Alcaraz, César Guasch, Fernando Cabrerizo, Ferrán Ginebrosa Pérez, Josep M. Petit, Juan Carlos Tejedor, Julio Ribas, Lorenzo Morillas, Marc Corretgé Gilart, Miguel Aznar, Rubén Domènech Sanz y Vicent Ibáñez.

¹ Institut de Ciències de l'Espai (CSIC)
² Universitat Autònoma de Barcelona
³ Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC)
⁴ Universidad Complutense de Madrid
⁵ Universitat Politècnica de Catalunya
⁶ Instituto de Astrofísica de Andalucía
⁷ D-Orbit-Satellite Launch and Deployment
⁸ Universidade de Santiago de Compostela
⁹ Universidad de Castilla-La Mancha
¹⁰ Universitat de València
¹¹ Universitat Ramon Llull
¹² Observatorio Astrofísico de Javalambre
¹³ Gran Telescopio Canarias
¹⁴ Universidad de La Rioja
¹⁵ Exeter University
¹⁶ European Space Astronomy Centre