

LA CAÍDA DE CALI

Un interesante meteorito a medio camino entre las condritas ordinarias H y L



En la tarde del 6 de julio de 2007 a las 4:33 \pm 1m hora local (21:32 \pm 1m UTC), los habitantes del centro del Valle del Cauca, Colombia, se sorprendieron por una bola de fuego que apareció en el cielo y escucharon varias explosiones. Instantes después, en la cercana ciudad de Cali se sintió una lluvia de piedras que perforó los tejados de diversas viviendas. Así comenzaba una inusual aventura científica... ¡había caído un meteorito!

Josep M. Trigo-Rodríguez, Luz Marina Duque, Martamónica Ruiz Echeverri, Juan Carlos Mejía, Jordi Llorca, José M. Madiedo, Mar Tapia y Marino Guarín Sepúlveda

Josep M. Trigo-Rodríguez (Instituto de Ciencias del Espacio –CSIC-IEEC–, Barcelona, España), Luz Marina Duque (Depto. de Filosofía, Universidad del Valle, Colombia), Martamónica Ruiz Echeverri (Instituto para la Investigación y la Preservación del Patrimonio Cultural y Natural del Valle del Cauca –INCIVA–, Colombia), Juan Carlos Mejía (Escuela de Astronomía de Cali, Colombia), Jordi Llorca (Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España), José M. Madiedo (Universidad de Huelva, España), Mar Tapia (Laboratori d'Estudis Geofísics Eduard Fontseré, Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, España), Marino Guarín Sepúlveda (Departamento de Ciencias Naturales y Matemáticas, Facultad de Ingeniería, Universidad Javeriana de Cali, Colombia).

INTRODUCCIÓN: EL COMIENZO DE UNA AVENTURA CIENTÍFICA

Alertados por los periodistas locales, miembros de la Asociación de Astrónomos Aficionados de Cali (ASAFI) y de la Escuela de Astronomía de Cali (EAC), al día siguiente viajaron al centro del Valle del Cauca para recoger testimonios con la expectativa de encontrar un cráter de impacto. Los astrónomos aficionados comprendieron pronto que el meteorito se había fragmentado en su sonoro y veloz paso por la atmósfera terrestre. Afortunadamente los sismógrafos locales habían capturado el leve movimiento generado por la onda sónica y pocos días después varios habitantes de los barrios del sureste de Cali reportaron la caída de piedras que, en más de una ocasión, atravesaron el techo y cayeron dentro de las viviendas (Figura 1).

LA BÚSQUEDA DEL METEORITO

Tras la caída, miembros de ASAFI y de la EAC se pusieron en contacto con Josep Maria Trigo-Rodríguez, del Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC) y miembro fundador de la Red Española de Investigación sobre Bóolidos y Meteoritos (SPMN) quien les brindó la asesoría necesaria para localizar meteoritos y recopilar información de los testigos oculares que permitiesen reconstruir la trayectoria que siguió el bólido en su ingreso a la atmósfera terrestre. Al mismo tiempo se ofreció a estudiar y clasificar cualquier fragmento que se recuperara sin gasto ninguno. Las tareas de búsqueda se realizaron sobre una extensión enorme del extrarradio de Cali y no hubiese sido factible sin el apoyo de muchos voluntarios a los que se agradece su participación al final de éste y de anteriores artículos arbitrados. Durante las semanas siguientes a la caída del meteorito, miembros de la EAC visitaban las casas en donde sus habitantes reportaban que había caído algún fragmento, conversaban con los dueños de esas viviendas y tomaban fotos (Figuras 1 y 8). Al mismo tiempo, cada fin de semana del mes de julio de 2007, los miembros de ASAFI recorrieron el centro del Valle del Cauca, recopilaron los testimonios, determinaron geográficamente las coordenadas desde donde los testigos vieron el fenómeno y calcularon alturas. Miembros de la EAC se sumaron a esta tarea el último fin de semana de julio (Figura 9). Este esfuerzo conjunto rindió frutos pues con los datos recopilados se pudo establecer la hora exacta del evento y reconstruir la trayectoria del bólido en su ingreso a la Tierra.

Desde España se alentó a los astrónomos aficionados a buscar ellos mismos los meteoritos. El objetivo era disponer de muestras para



Figura 1. Los primeros meteoritos encontrados perforaron los tejados de humildes viviendas del extrarradio de Cali. Los habitantes quedaron perplejos. (Cortesía J. C. Mejía –EAC/ASAFI–)

su estudio y clasificación pero también para preservar este meteorito para el disfrute de todos los colombianos. Así pues, los astrónomos aficionados tuvieron un papel fundamental en la tediosa tarea de recuperar meteoritos, haciendo largas caminatas por parques, canchas deportivas y espacios diversos de los barrios donde sus habitantes habían reportado la caída de piedras. Fruto de ese esfuerzo conjunto fueron encontrados algunos especímenes y uno de ellos se eligió por sus características para ser enviado a España. Por mediación de Jorge F. Estela



Figura 2. El primer meteorito mostraba la característica corteza de fusión de magnetita y ya sugería una naturaleza condritica del meteorito Cali. (Cortesía J. C. Mejía –EAC/ASAFI–)

Uribe, decano de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, se logró el apoyo de esta Universidad para enviar el fragmento al Instituto de Ciencias del Espacio en Barcelona con fines de estudio.

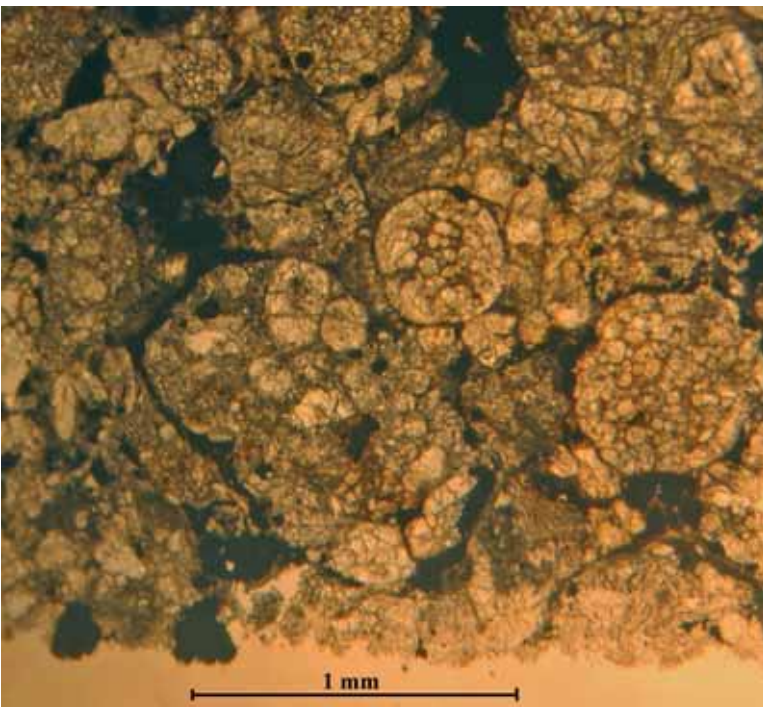


Figura 3. Imagen de transmisión a través de microscopio óptico de la sección delgada de Cali. Pueden apreciarse una gran variedad de cóndrulos pseudoesféricos y otras inclusiones. (J. M. Trigo –CSIC-IEEC–)

LA CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DEL METEORITO

Llegado el meteorito a Barcelona en el mes de agosto se procedió a su caracterización en el Instituto de Ciencias del Espacio y la Universitat Politècnica de Catalunya con la colaboración de un equipo internacional de científicos (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2009). El primer paso fue obtener secciones delgadas del meteorito que fueron estudiadas a microscopio óptico y electrónico para determinar su naturaleza. Tras una primera mirada a imágenes de transmisión obtenidas a través de microscopio petrográfico se evidenció que se trataba de una condrita bastante prístina en la que los cóndrulos y otras inclusiones eran fácilmente visibles (Figura 3). La naturaleza primitiva de Cali se hacía evidente en las secciones delgadas y fue finalmente clasificado como una condrita ordinaria H/L4. Debe proceder de un asteroide de pocos cientos de kilómetros de diámetro que no haya sufrido un alto nivel de metamorfismo térmico y que, por tanto, haya preservado tan bien los componentes primordiales. El valor 4 indica que ha sufrido una ligera alteración térmica por el metamorfismo ocurrido en su cuerpo progenitor (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2009).

Desde luego se trataba de una condrita muy prometedora pero, además, nos reservaba una sorpresa. Para evidenciarla tuvo que ser preciso un completo análisis químico y mineralógico en el que también participaron Alan E. Rubin del Institute of Geophysics & Planetary Physics (IGPP) de la Universidad de California Los Angeles (UCLA), Jeffrey N. Grossman del United States Geological Survey, y Derek W. G. Sears del Arkansas Center for Space and Planetary Sciences de la Universidad de Arkansas (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2009).

Por unos meses compartimos ese entusiasmo de tener entre manos una condrita inusual. De hecho, conforme se avanzó en los estudios de caracterización, el meteorito Cali despertó un inusitado interés en la comunidad científica. Los análisis químicos y mineralógicos mostraban una peculiaridad, una rareza que lo hacían muy especial. La composición de olivino de la condrita Cali era anómala y bastante inusual. Su contenido en un silicato denominado fayalita (Fe_2SiO_4) es intermedia entre los rangos característicos de las clases H y L de condritas ordinarias (véase Figura 6). Eso podría indicar que procede de un cuerpo progenitor diferente al que origina actualmente las más comunes caídas de condritas ordinarias H o L. Cabe tener en cuenta que, dado que son las resonancias gravitatorias las que impulsan rocas en órbitas próximas a la Tierra, existe un sesgo importante en los tipos de meteoritos que alcanzan la Tierra. No todo el cinturón principal de asteroides está adecuadamente muestreado sino tan solo aquellas regiones próximas a las resonancias

a(AU)	E	q(AU)	Q(AU)	$\omega(^{\circ})$	$\Omega(^{\circ})$	i(^{\circ})
> 1	Cualquiera	0,98 ± 0.02	> 1	149 ± 11	104.345 ± 0.004	< 10

Tabla 1. Rango de elementos orbitales (equinoccio J2000.0) estimado para el radiante y las velocidades preatmosféricas (12 a 18 km/s) dadas para el bólido progenitor del meteorito Cali. (Adaptado de Trigo-Rodríguez *et al.*, 2009).

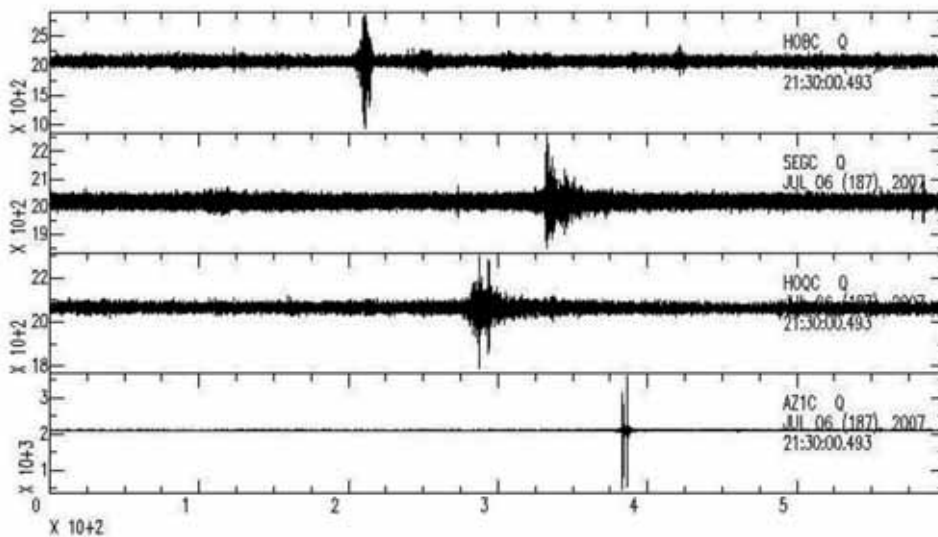
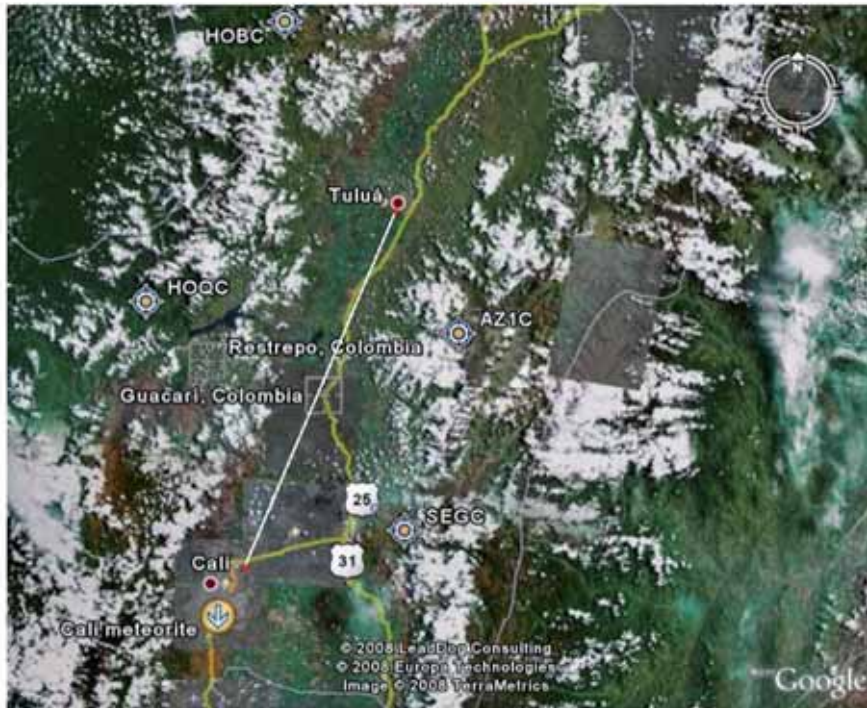


Figura 4. Arriba, mapa de *Google Earth* mostrando la ubicación de las estaciones sísmicas que detectaron el paso del bólido y su recorrido final antes de caer en el extrarradio de Cali (marcado con una flecha). Abajo, señales desde las cuatro estaciones arriba indicadas mostrando el tren de ondas característico asociado al paso de Cali. (Cortesía Diana Mendoza, OSSO-Universidad del Valle)

con las órbitas planetarias, principalmente con Marte, Júpiter y Saturno.

Además de la caracterización del meteorito, ese estudio previo permitió precisar la trayectoria en la atmósfera del meteorito gracias a la interpretación conjunta de los datos proporcionados por los testigos oculares y medidas realizadas con teodolitos, en una ardua tarea de recopilación de varias semanas por ASAFI y EAC. Esta trayectoria además era concordante con señales detectadas segundos después en estaciones sísmicas cercanas del Observatorio Sismológico del Sur Occidente (OSSO). La entrada del bólido en la atmósfera no solo fue visible sino también audible, ya que generó un tren de ondas infrasónico y sónico que fue suficientemente fuerte como para que las estaciones sísmicas lo detectaran en forma de vibración (Figura 5).

En definitiva, con los datos recogidos en las diferentes expediciones al centro del Valle del Cauca, los investigadores de la Red SPMN calcularon un rango de órbitas probables y se determinó que el meteorito posiblemente procedía del cinturón de asteroides (Tabla 1). El espécimen enviado a España fue sometido a análisis mineralógico, químico, susceptibilidad magnética, termoluminiscencia y fue clasificado, como se ha dicho, como una condrita ordinaria tipo H/L4. En particular los datos de termoluminiscencia indicaban que Cali no había sido expuesto a aproximaciones menores de 0,95 Unidades Astronómicas del Sol y que tampoco había sido transferido a su órbita cercana a la Tierra en menos de cien mil años (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2009b). Una vez se caracterizó el meteorito se remitió a la Meteoritical Society



Figura 5. Mapa del Valle del Cauca mostrando la trayectoria atmosférica del meteorito Cali. (Adaptada de Trigo-Rodríguez *et al.*, 2009)

quien se encargó de certificar y aceptar el nombre oficial de Cali para esta condrita que fue finalmente publicado en el *Meteoritical Bulletin* número 93. De ese modo Cali pasaba a la historia para convertirse en el segundo meteorito oficialmente reconocido de Colombia.

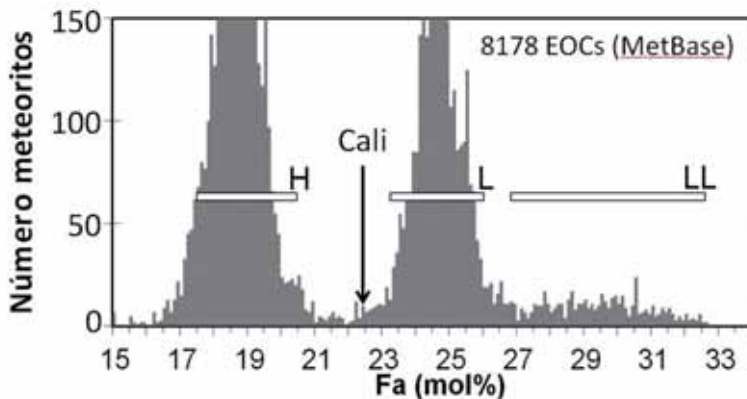


Figura 6. Histograma recopilando el contenido en fayalita de olivino que compone mayoritariamente los silicatos de 8.178 condritas ordinarias. Hay una clara distribución trimodal perteneciente a las clases H, L y LL, aunque los LL son minoritarios. El meteorito Cali presenta una composición intermedia entre el grupo H y L quizás representando un cuerpo progenitor del que difícilmente llegan fragmentos a la Tierra. (Cortesía J. Grossman. Figura adaptada de Trigo-Rodríguez *et al.*, 2009)

EL METEORITO CALI EN EL MUSEO DE CIENCIAS NATURALES FEDERICO CARLOS LEHMANN VALENCIA, DEL INCIVA

El equipo científico español, al igual que en anteriores caídas meteoríticas estudiadas en España –Villalbeto de la Peña en 2004 (Llorca *et al.*, 2005; Trigo-Rodríguez *et al.*, 2006) y Puerto Lápice en 2007 (Llorca *et al.*, 2009; Trigo-Rodríguez *et al.*, 2009c)–, deseaba priorizar que, una vez completado el estudio, el meteorito fuese expuesto para disfrute del público y así contribuir a difundir esta área de investigación. Por ello, el meteorito fue devuelto a la Universidad Javeriana de Cali que se encargaría de buscar un lugar para su ubicación definitiva. Desde octubre de 2010 el pueblo colombiano puede disfrutar de ese fantástico e histórico descubrimiento (Marina Duque y Ruiz Echeverri, 2010). Gracias al esfuerzo realizado por profesionales y aficionados a la astronomía colombianos, en octubre de 2010 el meteorito Cali encontró un lugar de excepción en la sala titulada *En el Universo...* del Museo de Ciencias Naturales Federico Carlos Lehmann Valencia, el cual es uno de los centros de investigación y divulgación científica del Instituto para la Investigación y la Preservación del Patrimonio Cultural y Natural del Valle del Cauca (INCIVA), en donde podrá ser apreciado por los 36.000 visitantes que acuden a este centro anualmente.

Meritoria es la labor de aquellos aficionados y simples observadores del fenómeno que mostraron una colaboración digna de elogio sin la cual el meteorito Cali hubiera quedado relegado, muy posiblemente, a un oscuro olvido en algún cajón. Gracias a ese esfuerzo conjunto podemos sentirnos enormemente satisfechos de haber conseguido interpretar la fascinante historia de una roca llegada desde un lejano rincón del Sistema Solar.

AGRADECIMIENTOS

Cabe destacar la labor de los aficionados a la astronomía de ASAFI y EAC que participaron en la recopilación de información y en la recuperación del meteorito: Julieta Arboleda, Yamileth Carvajal, Diego Castaño, Diana Castaño, Luz M. Duque, Luz Ángela Espinoza, Jair González, Juan C. Mejía, Julio Monsalvo, Monique Monsalvo, Fabricio Noguera y Guillermo Vega. Diana Mendoza (OSSO-Universidad del Valle) proporcionó los registros sísmicos del bólido. Los siguientes testimonios visuales fueron fundamentales para determinar la trayectoria y órbita más probable de Cali: Teresa Arce, Martín Caicedo, Hernando Ceballos, Janet Collazos, Martín Collazos, Alfredo Chávez, Nelson E. Escobar, Martha L. García, Juan M. Guzmán, Alberto Hernao, Omar



Figura 7. Algunos de los protagonistas durante la inauguración de las vitrinas del meteorito Cali en el Museo de Ciencias Naturales *Federico Carlos Lehmann Valencia* del INCIVA. (Cortesía de los autores)



Figura 8. Algunos integrantes del equipo de búsqueda visiblemente satisfechos al sostener fragmentos del meteorito Cali. Se encuentran en el interior de la casa donde se halló el espécimen. De izquierda a derecha: Guillermo Vega, la jovencita Paula Andrea Guarín, Marino Guarín y Juan Carlos Mejía. (Cortesía de los autores)



Figura 9. Los integrantes del equipo de recopilación de testimonios de la caída del meteorito Cali, formado por miembros y colaboradores de los grupos ASAFI y EAC. (Cortesía de los autores)

Hernández, Andrés F. López, Iván M. López, Fabián Orozco, John J. Orozco, Luís Rivas Puente, John J. Sánchez, Julián Stevens, Lisa M. Téllez, y H. Vivas. Gustavo Noguera y Yolanda Polanco proporcionaron gentilmente los especímenes para su estudio científico. El profesor Jorge F. Estela Uribe (Pontificia Universidad Javeriana de Cali) apoyó las tareas de recuperación y el envío de muestras. **A**

REFERENCIAS:

- L. Marina Duque y M. Ruiz Echeverri (2010). «El meteorito Cali expuesto en el Museo de Ciencias Naturales *Federico Carlos Lehmann Valencia* del INCIVA en Colombia». Nota de prensa de la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos (SPMN), www.spmn.uji.es/ESP/noveda90.html
- Llorca, J., J. M. Trigo-Rodríguez, J. L. Ortiz, J. Á. Docobo, J. García-Guinea, A. J. Castro-Tirado, A. E. Rubin, O. Eugster, W. Edwards, M. Laubenstein e I. Casanova (2005). «The Villalbeto de la Peña meteorite fall: I. Fireball energy, meteorite recovery, strewn field and petrography», *Meteoritics & Planetary Science* 40, 795-804.
- Llorca, J., I. Casanova, J. M. Trigo-Rodríguez, J. M. Madiedo, J. Roszjar, A. Bischoff, U. Ott, I. A. Franchi, R. C. Greenwood y M. Laubenstein (2009). «The Puerto Lápice eucrite», *Meteoritics & Planetary Science* 44, 159-174.
- Trigo-Rodríguez, J. M., J. Borovička, P. Spurný, J. L. Ortiz, J. Á. Docobo, A. J. Castro-Tirado y J. Llorca (2006). «The Villalbeto de la Peña meteorite fall: II. Determination of the atmospheric trajectory and orbit», *Meteoritics & Planetary Science* 41, 505-517.
- Trigo-Rodríguez, J. M., J. Llorca, A. E. Rubin, J. N. Grossman, D. W. G. Sears, M. Naranjo, S. Bretzius, M. Tapia y M. H. Guarín Sepúlveda (2009). «The Cali meteorite fall: A new H/L ordinary chondrite», *Meteoritics & Planetary Science* 44, 211-220.
- Trigo-Rodríguez, J. M., J. Llorca y D. W. G. Sears (2009b). «The Cali Luminescence of a recently fallen H/L ordinary chondrite», *Conference on Micro-Raman spectroscopy and Luminescence Studies in the Earth & Planetary Sciences*. American Institute of Physics Conference Proceedings.
- Trigo-Rodríguez, J. M., J. Borovička, J. Llorca, J. M. Madiedo, J. Zamorano y J. Izquierdo (2009c). «Puerto Lápice eucrite fall: strewn field, physical description, probable fireball trajectory, and orbit», *Meteoritics & Planetary Science* 44, 175-186.



Meteorito Cali. (Cortesía J. C. Mejía -EAC/ASAFI-)