

## ANÁLISIS DE DATOS DE INFRASONIDO DEL METEORITO DE AGUAS ZARCAS DE SAN CARLOS, COSTA RICA, 23 DE ABRIL 2019

### ANALYSIS OF INFRASOUND DATA OF THE METEORITE OF AGUAS ZARCAS OF SAN CARLOS, COSTA RICA, APRIL 23, 2019

Ronnie Quintero-Quintero<sup>1</sup>, Hairo Villalobos-Villalobos<sup>1</sup> y Daniela Campos-Durán<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup> Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

<sup>2</sup> Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

<sup>3</sup> Departamento de Dinámica de la Tierra y del Océano, Universidad de Barcelona, España.

\*Autor para contacto: dcd0490@gmail.com

(Recibido: 26/6/2019; aceptado: 02/9/2019)

**RESUMEN:** El 23 de abril de 2019 a las 21:07:22 hora de Costa Rica, las cámaras web del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica de la Universidad Nacional (OVSICORI-UNA), ubicadas en la cima de los volcanes Turrialba y Poás captaron un resplandor en la atmósfera que correspondió al paso de un meteorito que cayó en el distrito de Aguas Zarcas, San Carlos. Esto también fue registrado en el arreglo de infrasonido localizado en el volcán Turrialba entre las 03:12:19 y 03:12:37, hora UTC (Local+06) i.e. con una duración de 18 segundos. A las 03:12:19, la señal presentó un azimut posterior de 302.4°N, velocidad aparente de 347,0 m/s y una presión de 0,13 Pascales (Pa), además mostró una mayor amplitud a las 03:12:23 horas con 0,23 Pa, azimut posterior de 302,3° N, velocidad aparente de 352 m/s. Los datos con alta correlación (> 0,6) indican que el meteorito generó una onda infrasónica con velocidad aparente de 359 m/s, azimut posterior 302,4°N, una frecuencia media de 2,864±1,582 Hz y amplitud máxima de 0,23 Pa. Se considera que este fue un bólido pequeño con una energía estimada de 2.74 X 10<sup>10</sup> Julios. El meteorito fue reportado visto desde localidades como Cartago, Turrialba, Puntarenas, Liberia, Escazú, Fraijanes, San Ramón, Venecia, Ciudad Quesada y Aguas Zarcas de San Carlos.

**Palabras clave:** Costa Rica, meteorito, presión, velocidad aparente, azimut posterior, infrasonido.

**ABSTRACT:** On April 23, 2019, at 21:07:22 (Costa Rica time), the cameras of the Vulcanological and Seismological Observatory of Costa Rica of the National University, located in the Poas and Turrialba volcanoes, captured a resplendence in the atmosphere. That luminosity corresponded to a meteorite that fell in the district of Agua Zarcas in San Carlos. This was also registered in the infrasound arrangement located in the Turrialba volcano between 03:12:19 and 03:12:37, UTC (local time+ 6hrs) with a duration of 18 seconds. At 03:12:19 the signal showed a backazimut of 302.4°N, apparent velocity of 347,0 m/s and a pressure of 0,13 Pascal (Pa), also showed a greater amplitude at 03:12:23 with 0,23 Pa, backazimut of 302,3° and apparent velocity of 352 m/s. The data with high correlation (> 0,6) indicated that this meteorite generated an infrasonic wave with an apparent velocity of 359 m/s, backazimut of 302,4°N, an average frequency of  $2,864 \pm 1,582$  Hz and a maximum amplitude of 0.23 Pa. This meteorite was considered small with an estimated energy of  $2.74 \times 10^{10}$  Joules. It was seen from towns such as Cartago, Turrialba, Puntarenas, Liberia, Escazu, Fraijanes, San Ramon, Venice, Ciudad Quesada and Aguas Zarcas de San Carlos.

**Keywords:** Costa Rica, meteorite, pressure, apparent velocity, backazimuth, infrasound.

## INTRODUCCIÓN

La acústica física estudia las ondas sonoras audibles e inaudibles para el ser humano, las primeras corresponden a lo que comúnmente se denomina sonido, cuyas frecuencias están entre 20 y 20.000 Hz, mientras que las últimas son todas las ondas con frecuencias fuera de dicho rango. Las vibraciones sonoras que poseen frecuencias sobre los 20.000 Hz reciben el nombre de ultrasonidos, cuya zona límite superior es del orden de los GHz y corresponde a los hipersonidos mientras que las vibraciones sonoras con frecuencias situadas bajo los 20 Hz son llamadas infrasonidos (Evers, 2008; Gossard y Hooke, 1975). Los infrasonidos, se caracterizan principalmente por poseer grandes longitudes de onda, que se propagan en forma adireccional y presentar muy poca atenuación, por lo que son capaces de recorrer largas distancias sin mayor alteración (Gossard y Hooke, 1975).

Las señales infrasonicas viajan con la velocidad del sonido a 343 m/s a 20° C en el aire cerca de la superficie de la Tierra. Esta velocidad aumenta a temperaturas más altas, en una situación a favor del viento y viceversa. Además, esta velocidad depende de la propiedad fundamental del material que también se aplica a los sólidos y fluidos; los meteoros son considerados como

una fuente importante de ondas infrasonicas, la mayoría tienen una baja luminosidad y se producen a grandes altitudes en la atmósfera, solo una fracción de estos dan lugar a meteoros de alta luminosidad (bóolidos). Los meteoros grandes suelen ser destruidos a altitudes mayores a 80 km. Solo los que tienen alta resistencia pueden dar lugar a bolas de fuego de penetración profunda y producir explosiones cuando la presión dinámica es mayor que la resistencia del meteorito (ElGabry et al., 2017).

El principal fragmento del meteorito de Agua Zarcas cayó en Barrio La Caporal de Agua Zarcas (masa principal de 1071 g), otros fragmentos del orden de hectogramos fueron recuperados en La Cocaleca de Agua Zarcas y en Santa Rosa de La Palmera (Soto et al., 2019). Este meteorito fue registrado en un arreglo de infrasonido a 75 km de distancia; ubicado en la cercanía de la cima del Volcán Turrialba, asimismo fue captado por las cámaras del OVSICORI-UNA, instaladas en la cima de los volcanes Poás y Turrialba a 25 y 75 km de distancia, respectivamente (Figura 1).

En este estudio se analizaron las señales infrasonicas de este meteorito utilizando los datos registrados por la estación de infrasonido ubicada en el volcán Turrialba (IVTCR), por ser datos que se registran en tiempo real. Por tanto,

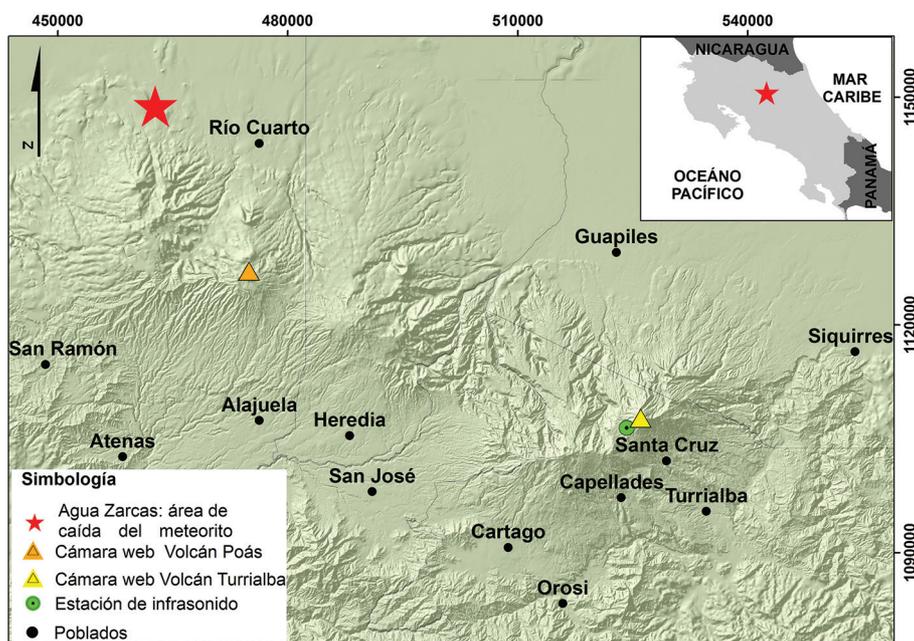


Fig. 1: Área donde cayó el meteorito en Agua Zarcas de San Carlos indicado con una estrella roja, así como las cámaras web del OVSICORI-UNA que captaron la luminiscencia y la estación de infrasonido en el volcán Turrialba que detectó las frecuencias de onda del paso, fragmentación y la caída del meteorito.

la importancia de esta investigación radica en que corresponde al primer meteorito registrado por un arreglo de este tipo en Costa Rica; lo que permitió caracterizar la fuente generadora de la señal infrasónica. Parámetros del meteorito serán refinados una vez que se obtenga y analice información de otras estaciones de infrasonido del Sistema Internacional de Monitoreo de la Comisión Preparatoria para la Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (CTBTO); como la estación instalada en la Estación Biológica La Selva, en Puerto Viejo de Sarapiquí, Heredia, sin embargo, esto corresponde a una segunda etapa de esta investigación.

Los arreglos instrumentales (sísmicos o de infrasonido) se componen de una serie de instrumentos (tres o más) colocados con cierta configuración geométrica y muy cercanos unos de los otros que registran señales acústicas homogéneas

que son usadas para mejorar la relación señal a ruido, así como para medir la velocidad vectorial de un frente de onda incidente en este, la lentitud y el azimut posterior; información que puede ser usada para apilar las formas de onda registrada en cada componente del arreglo y mejorar la relación señal a ruido. La velocidad vectorial por tanto permite determinar el lugar de donde proviene la energía observada en el arreglo (Rost y Thomas, 2002).

La población reportó, a través de la red social Facebook del OVSICORI – UNA, avistamientos del meteorito desde diferentes sitios del país, destacando poblados como Cartago, Turrialba, Ochomogo, San Francisco de Heredia, Puntarenas, Liberia, Escazú, Fraijanes, San Rafael de San Ramón, San Ramón, Bajo Los Rodríguez, Venecia, Ciudad Quesada, Aguas Zarcas de San Carlos, Caporal, Cocaleca y Santa Rosa de la Palmera. Vecinos de Agua Zarcas reportaron que inicialmente el meteorito parecía una bola de fuego que al

inicio se desplazaba sin producir causar ruido, sin embargo, pocos segundos después se fragmentó en tres partes produciendo un fuerte ruido. El tamaño del meteorito de Aguas Zarcas, antes de fragmentarse, fue probablemente significativo, ya que se han recuperado fragmentos con un máximo reportado de alrededor de 1 kg (Soto et al., 2019). Esta noticia fue cubierta por parte de la prensa nacional e internacional, además se despertó el interés de la comunidad científica nacional e internacional por estudiar este evento.

## METODOLOGÍA

Esta investigación muestra la correlación del paso, la fragmentación y la caída del meteorito con series de tiempo de un arreglo de sensores de infrasonido: H1 (10.00784°N y 83.77287°W), H2 (10.00688°N y 83.77170°W), H3 (10.00662°N y 10.00662°N) y H4 (10.00727°N y 83.77233°W) instalados en las cercanías del volcán Turrialba. Este arreglo fue instalado en conjunto por el Laboratorio de Geofísica Experimental, Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Florencia, Italia (UNIFI) y el OVSICORI-UNA y consiste en una configuración tetraédrica que tiene

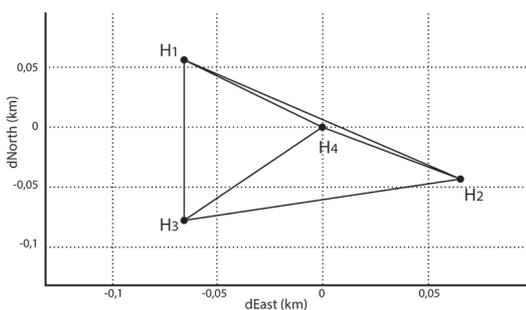


Fig. 2: Geometría de los 4 elementos del arreglo de Infrasonido del Volcán Turrialba (IVTCR) que consiste en 4 elementos (sensores) indicadas por las letras H1, H2, H3 y H4; donde H4 es la estación de referencia. El arreglo de los 4 elementos de infrasonido tiene sensores marca IteM s.r.l y modelo prs0100a, con una sensibilidad de 25 mV/Pa y respuesta plana entre 0.1 y 100 Hz. La sensibilidad del sistema de detección (sensor y digitalizador) de infrasonido es de 1.28 e-04 Pascales/Cuentas.

una disposición horizontal con apertura de 150 metros con los elementos ubicados en cada uno de los vértices del triángulo equilátero y uno localizado ligeramente hacia el centro (Figura 2).

Los datos registrados por el arreglo de infrasonido correspondieron a la dirección, la velocidad aparente de la onda de presión, frecuencias y energía liberada por el meteorito. Información que fue transmitida en tiempo real a OVSICORI-UNA, ubicado en Heredia, Costa Rica, por medio del sistema de comunicación de datos de modem celular 3G y almacenados por el sistema de adquisición y almacenamiento ANTELOPE (<http://www.brtt.com/software.html>) en formato CD1.1 a 100 muestras por segundo; posteriormente los datos fueron convertidos a formato miniSEED.

Para el procesamiento, visualización y análisis de los datos, se utilizó el programa informático de la Oficina Francesa de Energía Atómica y Energías Alternativas DTK-GPMCC (Cansi, 1995; Cansi y Pichon, 2008), al cual se tiene acceso en el Centro Nacional por la Comisión Preparatoria para la Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (CTBTO).

El algoritmo PMCC asume ruido no correlacionado y se basa en el procesamiento de datos en forma progresiva para triadas del arreglo, donde se usa el método de correlación cruzada en el dominio del tiempo entre pares de estaciones para medir el retardo de tiempo; para la propagación de la onda sin distorsión el retardo es igual para todas las bandas de frecuencias estudiados y la suma de los retardos en triadas obedece una relación de cierre i.e. la suma es cero. La consistencia se verifica para todas las triadas donde se define el residuo medio cuadrático (RMC) de la relación de cierre. Este último valor (RMC) es el que define el valor límite de detección (Park et al., 2015; McKee et al., 2018; Scripps, UCSD, 2019).

Estos datos fueron respaldados con las imágenes captadas por las cámaras instaladas por el OVSICORI – UNA en las cimas de los volcanes Poas y Turrialba, lo que permitió correlacionar en tiempo real el paso del meteorito y las señales de infrasonido captadas por el arreglo. Todas las

cámaras web del OVSICORI-UNA están sincronizadas a un servidor de tiempo internacional del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, ubicado en Maryland, Estados Unidos, usando el Protocolo de Tiempo de la Red; con resolución de un segundo y una zona de tiempo de la

Ciudad de México (UTC-6) y ellas actúan como una computadora que coloca el tiempo en las imágenes. Además, las imágenes de las cámaras web son almacenadas con hora local y las de la serie de tiempo en hora UTC (Local +06); por lo que en este análisis se mencionan ambas horas; indicando

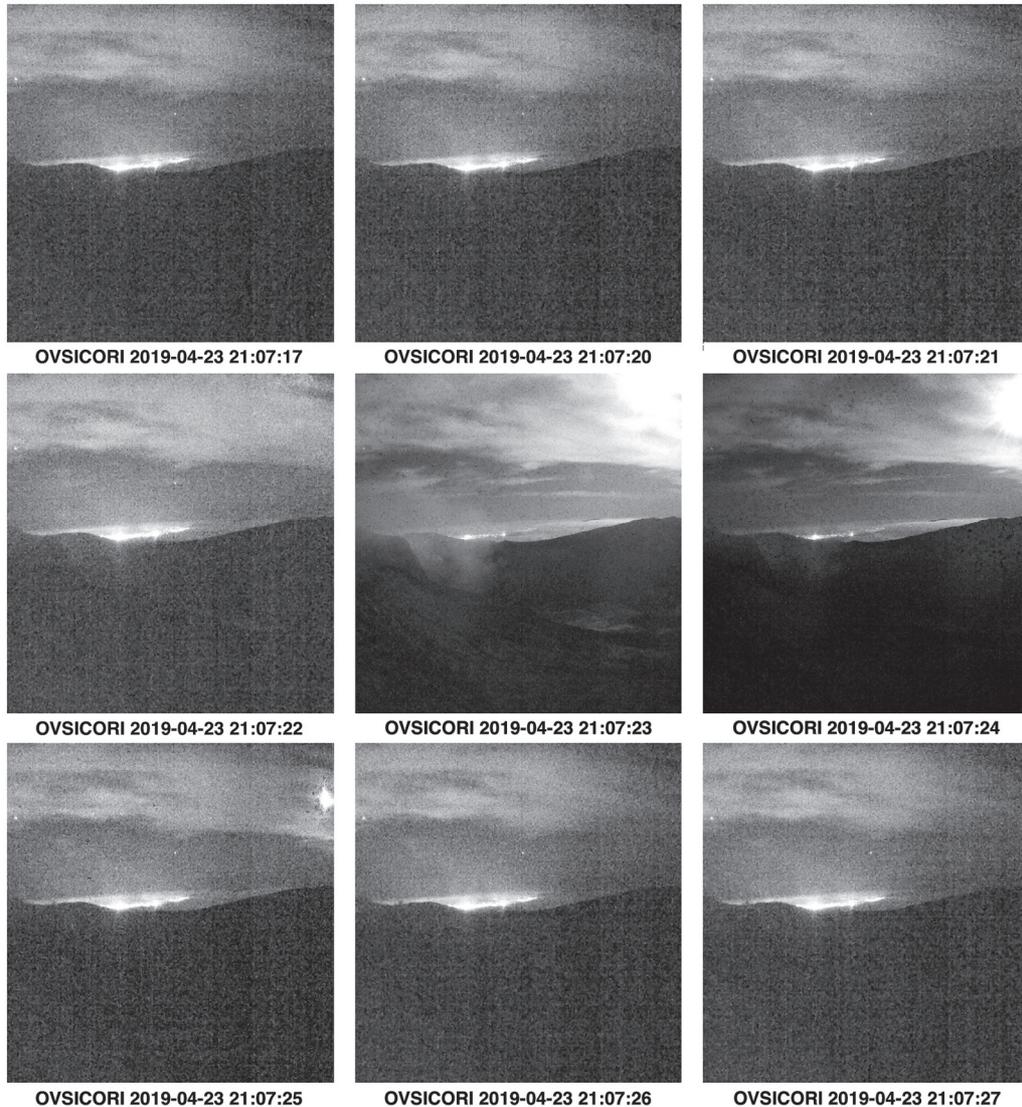


Fig. 3: Collage de fotos de la luminosidad generada por el paso del meteorito en la atmósfera captada por la cámara web del OVSICORI-UNA ubicada en la cima del Volcán Turrialba, Costa Rica, la noche del 23 de abril del 2019. La primera imagen es de 21:07:19 y la última de las 21:07:27 hora local.

que el paso del meteorito se dio la noche del 23 de abril en Costa Rica, lo que significa que en hora UTC corresponde a la madrugada del día siguiente.

## RESULTADOS

### Registro del paso del meteorito en las cámaras del OVSICORI-UNA en las cimas de los volcanes Poás y Turrialba

El 23 de abril de 2019; a las 21:07:22 hora de Costa Rica, las cámaras web ubicadas en la cima de los volcanes Poás y Turrialba captaron un resplandor en la atmósfera, asociado al paso de un meteorito, caída que se reportó en Agua Zarcas de San Carlos. La cámara ubicada en la cima del volcán Turrialba y con orientación NO permitió observar que el bólido se movió hacia el NO desde la ubicación de la cámara. Este dispositivo capta imágenes cada segundo, por lo que se deduce con una precisión de segundos que la duración de la luminosidad fue de 4 segundos, empezando a las 03:07:22 hasta las 03:07:25, hora UTC (Figura 3).

En el volcán Poás se encuentran colocadas dos cámaras web con distinto tiempo de almacenamiento de imágenes. Las imágenes de la primera cámara web son guardadas cada 5 segundos y registró un destello a las 03:07:23 hora UTC. Las imágenes anterior y posterior a esta fueron a las 03:07:18 hora UTC y a las 03:07:28 hora UTC, sin embargo, en esta no se logró observar ninguna luminosidad. Este hecho permite aseverar que la luminosidad registrada en la cámara fue menor a 10 segundos;

en la segunda cámara se observó la luminosidad a las 03:07:22 hora UTC (Figura 4). Por tanto, todas las cámaras del OVSICORI-UNA al estar sincronizadas permitieron determinar que la hora en que se captaron las imágenes en la cima del volcán Poás coincide con la hora en que se captó la luminosidad en la cámara web ubicada en la cima del volcán Turrialba; por lo que este puede ser el tiempo estimado de entrada del meteorito a la atmósfera terrestre.

### Señales de infrasonido registradas por el paso del meteorito en la estación IVTCR

Tomando como referencia en tiempo indicado por las cámaras web sobre el paso del meteorito se procedió a ubicar en la serie de tiempo de la estación de infrasonido la respectiva señal asociada a este. Usando diferentes puntos en un mapa que abarcara los volcanes Poás y Turrialba, se determinó que el tiempo de arribo al arreglo del Turrialba se ubica cerca a las 03:10:30 hora UTC.

Los registros en el arreglo de infrasonido IVTCR muestran una señal bien definida cerca de las 03:12:20 horas UTC del 24 de abril del 2019 (Figura 5); por lo cual se asocia esa señal con el cambio de presión generado por el meteorito. Después de reconocer la señal, se asignó una ubicación y tiempo de origen que permitiera predecir un arribo a las 03:12:20 hora UTC en IVTCR.

Para encontrar esa fuente puntual se realizó una búsqueda en una rejilla de la Cordillera Volcánica Central, usando una celeridad fija de 0,33 km/s y variando el tiempo. El lugar que predice un arribo de la onda de presión a las 03:12:20



Fig. 4: Luminosidad captada por las cámaras web del OVSICORI-UNA ubicadas en la cima del volcán Poás, la noche del 23 de abril del 2019. La hora local de las imágenes es 21:07:18, 21:07:22, 21:07:23 y 21:07:28 y se asocia al paso del meteorito.

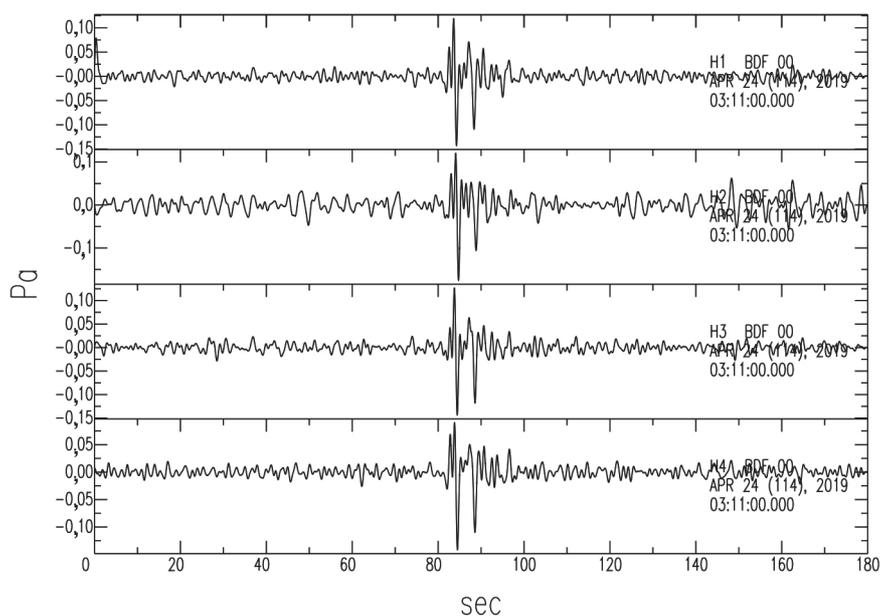


Fig. 5: Serie de tiempo de la onda sónica del bólido del 23 de abril de 2019 fecha local; se aprecia una señal bien clara a las 03:12:20 hora UTC, del 24 de abril del 2019 en los 4 elementos H1, H2, H3 y H4 del arreglo IVTCR; ubicado en el Volcán Turrialba. La señal mostrada tiene removida la media y la tendencia lineal; también está filtrada en la banda 0.2 a 1 Hz. En el eje de las abscisas se indica el tiempo en segundos y en el eje de las ordenadas la presión en Pa.

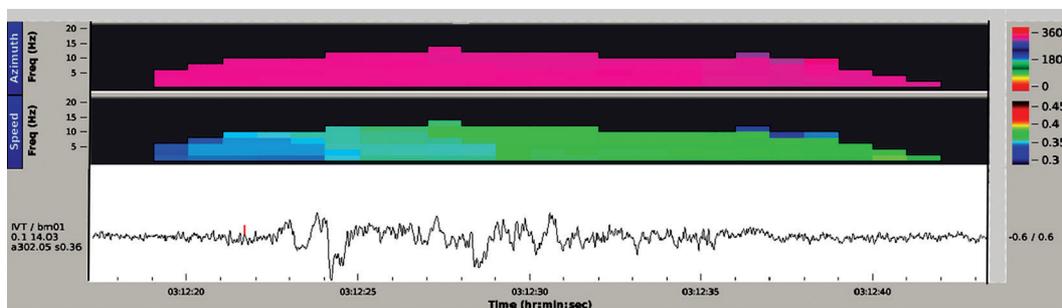


Fig. 6: Interfaz de la estación IVTCR, donde se muestra en la parte superior el azimut posterior, en la figura intermedia, la velocidad aparente y en la parte inferior las trazas en cada uno de los componentes y la traza sumatoria de formación de haces direccionales. La escala en la parte superior derecha de las figuras superiores indica el azimut de 0 a 360° y la velocidad aparente de 0,3 a 0,45 km/s.

hora UTC, se ubica en Santa Rosa de la Palmera de Aguas Zarcas de San Carlos, con un tiempo de origen de 03:08:17 hora UTC. Por lo tanto, este es el tiempo de origen que se le asigna a la fragmentación y explosión del meteorito antes de caer al suelo y que coincide con observaciones de personas de la comunidad que indican un tiempo de explosión del meteorito cercana a las 21:08 (03:08 UTC).

Aunado a lo anterior se realizó un análisis de la variación temporal del cambio de presión en IVTCR; de ello se obtuvo que la primera onda arribó a las 03:12:19 hora UTC y provenía del NO, con un azimut posterior de 302,4°N, amplitud de 0,13 Pa, velocidad aparente de 0,347 km/s y a las 03:12:34 hora UTC la amplitud es de 0,084 Pa y azimut posterior de 300,4°N;

la máxima amplitud de 0,23 Pa se obtiene a las 03:12:23 hora UTC. El azimut temporal es bastante constante con un valor promedio de  $302,1^{\circ} \pm 0,049^{\circ}N$ , velocidad aparente de 0,362 km/s, frecuencia media de  $5,39 \pm 3,25$  Hz y la duración de la señal se registra entre las 03:12:19 y las 03:12:41 hora UTC (Figura 6).

Para el cálculo de otras propiedades del meteorito, como la energía de impacto, se realizaron supuestos sobre la masa inicial y velocidad de entrada a la atmósfera. Considerando que un fragmento analizado tuvo una masa de 1 kg y que pobladores de la zona han encontrado otros trozos, pero estos no han sido contabilizados; podemos suponer que unos 4 kg, pueden corresponder a la masa del meteorito encontrado. De acuerdo con la Academia de Ciencias de Rusia (2013), la masa de los meteoritos encontrados es de 1-5 % del total de la masa inicial; por lo que una masa inicial de 200 kg sería adecuada para el meteorito de Aguas Zarcas.

Usando esa masa y una velocidad de 11,7 km/s, que es la velocidad mínima de entrada de un meteorito a la atmósfera (Antier et al., 2008); se obtiene una energía radiada de  $2,7378E+10$  Julios [ $kg \times (m/s)^2$ ] y una energía de impacto E equivalente a 0.0963kt TNT (Centro de Estudios de Objetos cercanos a la

Tierra, 2019), esto es 135 veces menor que la energía de la bomba de Hiroshima. La energía explosiva ( $E_s$ ) liberada por la fragmentación fue la equivalente a 0.031 toneladas TNT, calculada a partir de una frecuencia dominante de 0.8 Hz para la amplitud máxima (Figura 7) y la relación  $\log_{10}(E_s/2) = 3.34 \log_{10}(1/f) - 2.58$  (Antier et al., 2008).

### Reporte de avistamientos a través de redes sociales, interés en la prensa y comunidad científica nacional e internacional

El resplandor que se observó la noche del 23 de abril de 2019 a las 21:07:22 hora local fue reportado casi de manera inmediata por la población por medio de redes sociales, quienes reportaron el avistamiento desde poblados como Cartago, Turrialba, Quepos, Ochomogo, San Francisco de Heredia, Puntarenas, Liberia, Escazú, Fraijanes, San Rafael de San Ramón, San Ramón, Bajo Los Rodríguez, Pital de San Carlos, Venecia, Ciudad Quesada, Aguas Zarcas de San Carlos, Caporal, Cocaleca y Santa Rosa de la Palmera (Figura 8).

Segundos después de esto se reportó la caída de un meteorito en Agua Zarcas de San Carlos, siendo en barrio La Caporal donde se recuperó el fragmento de mayor tamaño (1071 g), el cual causó la ruptura del techo, una cercha de madera y de unas mesas plásticas en la vivienda donde impactó (Soto et al, 2019). Otros fragmentos de menor tamaño fueron recuperados en La Cocaleca y en Santa Rosa de la Palmera.

Este evento no tardó en ser cubierto por medios de comunicación nacionales, tanto escritos como televisivos, quienes dieron a conocer la noticia desde la misma noche en que el meteorito cayó. Asimismo, la comunidad científica nacional se interesó en estudiar la composición del meteorito, destacando el papel que tuvo la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, cuyos investigadores determinaron que este meteorito es de tipo condritico (posiblemente carbonácea), cuya edad se acerque a los 4560 millones de años, aunque es necesario llevar a cabo dataciones para confirmar esa edad (Soto et al, 2019).

Asimismo, el evento causó furor entre la población local de Agua Zarcas, quienes salieron en

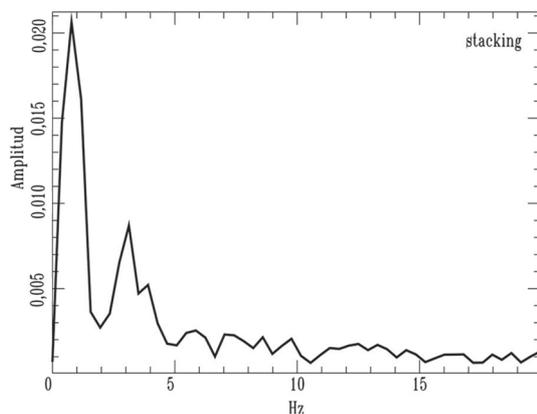


Fig. 7: Espectro de la suma de las trazas H1, H2, H3 y H4. El cálculo del espectro se hace con la serie de tiempo donde el cambio de presión tiene mayor amplitud. Se observan dos lóbulos principales con frecuencias dominantes de 0.8 Hz y 3.1 Hz.



Fig. 8: Sitos donde se reportó el avistamiento de la luminiscencia del meteorito la noche del 23 de abril.

busca de fragmentos de meteorito, ya fuera para conservarlos o venderlos, de acuerdo con Vargas y Chinchilla (2019) los restos del meteorito se comercializaban por internet entre 3000 y 18 000 colones el gramo y los principales compradores son coleccionistas de Estados Unidos, Rusia y Puerto Rico. Actualmente fragmentos del meteorito se encuentran en institutos de investigación como el Centro de Estudios para Meteoritos de la Universidad Estatal de Arizona, en Estados Unidos; el Instituto de Meteoríticos de la Universidad de Nuevo México en Albuquerque, también en EE. UU. y el Museo de Geociencias Miriam Della Posta de Azevedo en Sao Paulo, Brasil. También se detallan dos coleccionistas privados: Michael Farmer, quien vive en Tucson, Arizona, EE. UU. y otro coleccionista de apellido Ward, de quien no se consigna información (Rodríguez, 2019).

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La sincronización del tiempo en las cámaras web operadas por el OVSICORI-UNA con un servidor internacional de tiempo real permitieron con una precisión de un segundo conocer que la duración de la luminosidad no superó los 4 segundos, la

primera grabación fue a las 21:07:22, hora local del 23 de abril de 2019, que corresponde a la hora de grabación y la hora de la explosión en la localidad de Aguas Zarcas; donde los vecinos la reportan cercana 21:08; esto permitió asociar un cambio de presión en los elementos del arreglo a las 03:12:19 con la fragmentación y explosión del meteorito. Usando el programa DTK-PMCC para el análisis de los datos de infrasonido permitió determinar el tiempo de origen de la explosión a las 03:08:17 horas; calculado a partir de una fuente puntual, celeridad fija y arribo de la señal al arreglo.

Los datos iniciales del arreglo son visibles a las 03:12:19, indicando un azimut posterior de  $302,4^{\circ}\text{N}$ ; dirección que concuerda con la explosión y fragmentación del meteorito en Santa Rosa de la Palmera, Aguas Zarcas a las 03:08:17 y no con la hora de la claridad observada por las cámaras web del OVSICORI-UNA. La onda de presión indica una amplitud máxima registrada de 0,23 Pa y con frecuencias menores a 20 Hz (Figura 9); los datos de mayor correlación indican una duración de 18 segundos entre la 03:12:19 y las 03:12:37, con una media de la velocidad aparente de 359 m/s y azimut posterior de  $302,4^{\circ}\text{N}$ .

La suma de las señales de los elementos del arreglo muestra dos frecuencias fundamentales

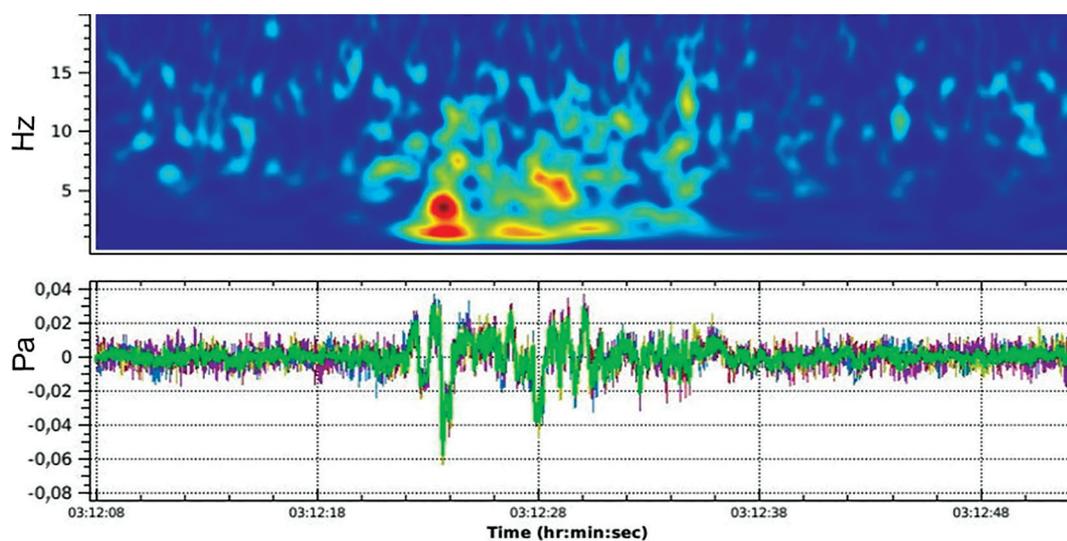


Fig. 9: Espectrograma de aproximadamente 44 segundos de datos y en la figura inferior se muestra en verde la traza sumatoria.

Cuadro 1

Datos de Bóolidos y bolas de fuego registradas por el Centro de Estudios de Objetos cercanos a la Tierra de la NASA

Brillo Máximo Fecha/Hora (UT)	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altura (km)	Velo- cidad (km/s)	vx	vy	vz	Energía Total radiada (J)	Energía de Impacto Total calculada (kt)
6/20/19 6:07	7.3N	67.6W	37					2.80E+10	0.098
10/22/18 7:11								2.60E+10	0.092
7/26/13 11:32	21.0N	178.5W	37					2.00E+10	0.073
7/18/13 0:46								2.20E+10	0.079
11/20/11 5:25	27.9S	116.3E						2.30E+10	0.082
2/1/99 14:24	80.0N	154.2E						2.80E+10	0.098
1/19/99 2:32	7.9N	85.8E						2.40E+10	0.086
12/22/98 9:24								2.70E+10	0.095
11/23/98 20:20	82.3N	160.1E						2.50E+10	0.089
6/25/96 11:22								2.10E+10	0.076
5/8/96 1:02								2.80E+10	0.098
3/31/96 0:53								2.70E+10	0.095
12/27/95 12:55								2.20E+10	0.079

con 0,8 y 3,1 Hz. El meteorito presentó una fragmentación antes de caer al suelo; la energía de esta explosión fue el equivalente a 0,031 toneladas TNT y la de impacto en la atmósfera de 0,096 toneladas TNT. Los datos de presión máxima, frecuencias fundamentales y energía concuerdan con registros de otros bólidos pequeños registrados por el Centro de Estudios de Objetos cercanos a la Tierra de la NASA (Cuadro 1).

La interfaz gráfica generada mostrada en la figura 6 muestra multiplicidad de fases, esto debido a que los sensores no son tan sensibles para extraer más información del paso, fragmentación, explosión y caída del meteorito; pero los datos originados por la caída de este serán refinados una vez se obtenga y analice información de otras estaciones de infrasonido como la instalada en la Estación Bilógica La Selva.

## CONCLUSIONES

Bólidos de gran tamaño son registrados por estaciones internacionales como las del IMS del CTBTO; pero, para estudios de meteoritos pequeños como el de Aguas Zarcas es importante contar con un arreglo local como el del IVTCR; que permite caracterizar la fuente infrasónica, preferiblemente con sensores de mayor sensibilidad. El uso de arreglos de infrasonido como el IVTCR permite resaltar la señal producto de la explosión del meteorito porque esta es muy homogénea en todas las componentes del arreglo y así cuando se suman se incrementa la relación de la señal a ruido. En este caso se puede asociar con la forma de onda de presión la hora de la explosión y su energía y compararla con los datos aportados por el público. Los datos confirman que este fue un meteorito pequeño, ya datos de otros meteoritos de igual tamaño registrados por estaciones de infrasonido fuera de nuestras fronteras permite hacer esta aseveración. Las condiciones climáticas el día que se vio el meteorito permitieron documentarlo por la población local y por medio de

cámaras web de vigilancia de institutos de investigación y de organizaciones nacionales, por tanto, la importancia de la unificación de tiempo por medio de una sincronización a un servidor internacional en las cámaras del OVSI-CORI-UNA permitió relacionar los registros de estas con la señal de presión en la estación IVTCR. El uso del programa DTK-GPMCC permite generar un boletín con datos de fase, fecha, azimut, velocidad aparente, correlación, RMS de amplitud, tamaño de familia entre otros parámetros; es el programa oficial usado por la organización CTBT en su rutina diaria de análisis infrasónico; por lo tanto, existe un alto grado de confiabilidad en los parámetros preliminares presentados en este trabajo. El azimut posterior obtenido indica la zona donde el meteorito explotó y fragmentó; ubicado al NO de la estación IVTCR.

## REFERENCIAS

- Academia de Ciencias de Rusia (2013). Bólido de Chelyabinsk (en ruso). Recuperado de: <http://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=1da2959b-902f-46b2-9f1f-0c62d19740e8#content>
- Antier, K., Le Pichon, A., Cansi, B., Hernández, E., Minaya, B., Burgoa, D., Drob, L y Evers, G. (2008). Atmospheric entry and impact of the September 15, 2007 Desaguadero meteoroid. *InfraMatics The Newsletter of Subaudible Sound*, 21, 2-12.
- Cansi, Y. (1995). An automatic seismic event processing for detection and location: the PMCC method. *Geophysical Research Letters*, 22, 1021-1024. DOI: <https://doi.org/10.1029/95GL00468>
- Cansi, Y., Le Pichon, A. (2008). Infrasound Event Detection Using the Progressive

- Multi-Channel Correlation Algorithm. In: Havelock, D., Kuwano, S., Vorlander, M., (eds) *Handbook of Signal Processing in Acoustics*. Springer, New York, NY., 1425-1435. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-30441-0\\_77](https://doi.org/10.1007/978-0-387-30441-0_77)
- Centro de Estudios de Objetos cercanos a la Tierra. (2019). Bolas de fuego y datos de bolide. Recuperado de: <https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>
- ElGabry, M., Korrat, I., Hussein, H y Hamama, I. (2017). Infrasound detection of meteors. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 6, 68-80, DOI: 10.1016/j.nr-jag.2017.04.004
- Evers, G. (2008). The Inaudible Symphony: on the Detection and Source Identification of Atmospheric Infrasound. Ph.D. Thesis, Universidad Técnica de Delft, Países Bajos. Tesis.
- Gossard, E y Hooke, W. (1975). Waves in the Atmosphere: Atmospheric infrasound and gravity waves. Their generation and propagation. Amsterdam: Elsevier scientific.
- McKee, K., Fee, D., Haney, M., Matoza, R y Lyons, J. (2018). Infrasound signal detection and back azimuth estimation using ground-coupled airwaves on a seismo-acoustic sensor pair. *Journal of Geographical Research-Solid Earth*. 123, 6826-6844. DOI: <https://doi.org/10.1029/2017JB015132>
- Park, J., Hayward, C., Zeiler, C., Arrowsmith, S y Stump, B. (2015). A Comparative Study of Automated Infrasound Detectors - PMCC and AFD with Analyst Review. United States. Web.
- Rodríguez, I. (2019). Meteorito 'Aguas Zarcas' ya fue bautizado oficialmente y hay trozos en Costa Rica, EE. UU. y Brasil. Periódico La Nación. Recuperado de: <https://www.nacion.com/ciencia/aplicaciones-cientificas/meteorito-aguas-zarcas-ya-fue-bautizado/3JTD7M6JT5FHJHHCP2CLQNQWBA/story/>
- Rost, S y Thomas, C. (2002). Array seismology: Methods and applications. *Reviews of Geophysic.* 40, 1-27. DOI:10.1029/2000RG000100
- Scripps, University of California, San Diego. (2019). Laboratory for Atmospheric Acoustics. PMCC\_general.doc. Recuperado de: [https://l2a.ucsd.edu/local/L2A\\_manual.php](https://l2a.ucsd.edu/local/L2A_manual.php)
- Soto, G., Lucke, O y Madrigal, P. (2019). El Meteorito de Aguas Zarcas, caído el 23 de abril del 2019. Universidad de Costa Rica. *Informe técnico*. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/333059289\\_El\\_Meteorito\\_Aguas\\_Zarcas\\_caido\\_el\\_23\\_de\\_abril\\_del\\_2019](https://www.researchgate.net/publication/333059289_El_Meteorito_Aguas_Zarcas_caido_el_23_de_abril_del_2019)
- Vargas, M y Chinchilla, E. (2019). Restos del meteorito en Aguas Zarcas se comercializan entre €3.000 y €18.000 el gramo. Periódico La Nación. Recuperado de: <https://www.nacion.com/ciencia/aplicaciones-cientificas/restos-del-meteorito-en-aguas-zarcas-se/AO7YUI2QGZBRPCAH6NBA62JHJQ/story/>

