

Distinción de un Evento Sísmico: ¿Terremoto o Explosión Nuclear?

Discriminating a Seismic Event-Earthquake or Nuclear Explosion

MIGUEL ANGEL SERRANO¹

Recibido: 25 de julio de 2018/ Aceptado: 25 de octubre de 2018

¹Miguel Angel Serrano email:
sesa.mangel@gmail.com

Agradecimientos

Aprecio enormemente los esfuerzos y el apoyo del gobierno japonés, JICA (Japan International Cooperation Agency), BRI (Building Research Institute), IISEE (International Institute of Seismology and Earthquake Engineering) y a todos los involucrados por organizar el curso en el cual he adquirido este conocimiento.

Especial Thanks

I greatly appreciate the efforts and support of the Japanese government, JICA (Japan International Cooperation Agency), BRI (Building Research Institute), IISEE (International Institute of Seismology and Earthquake Engineering) and all those involved in organizing the course in which I have acquired this knowledge.

En este artículo introducimos el esfuerzo de CTBTO, Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares, para discernir eventos sísmicos, o sea determinar si son un terremoto o una prueba nuclear. Luego presentamos distintos conceptos y técnicas que podemos utilizar nosotros para determinar si un evento es natural o una explosión. Por último concluimos con una serie de ejemplos en los cuales aplicamos dichos criterios para luego determinar cual es la naturaleza de los eventos analizados.

In this article we introduce the CTBTO, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, effort to discern seismic events, that is to determine whether they are an earthquake or a nuclear test. Then we will present different concepts and techniques that we can use to determine if an event is natural or an explosion. Finally, we conclude with a series of examples in which we apply these criteria and then determine the nature of the analyzed events.

PALABRAS CLAVES

CTBTO, Terremoto, Explosión Nuclear, Localización de Hipocentro, Complejidad, Magnitud de Ondas de Cuerpo, Magnitud de Ondas Superficiales.

KEYWORDS

CTBTO, Earthquake, Nuclear Explosion, Hypocenter Location, Complexity, Body Wave Magnitude, Surface Wave Magnitude.

PACS

91.30.Rz

I | INTRODUCCIÓN

CTBTO (Bittner, n.d.) (Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares) es una organización internacional que tiene como principal propósito la verificación de la prohibición de pruebas nucleares y por lo tanto, operar un sistema de motorización en todo el mundo.

La comisión preparatoria de CTBTO se estableció desde 1997, el tratado entrara en vigencia una vez que los 44 estados mencionados en el anexo dos del tratado hayan ratificado el tratado. Dichos estados han sido seleccionados debido a la posesión de reactores nucleares o un avanzado uso de

* Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial 4.0 Internacional ©iN

* This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. ©iN

tecnologías nucleares. Los países que todavía no firman ni ratifican el tratado son India, Pakistán, y la República Popular Democrática de Corea (cuyas recientes pruebas nucleares han sido detectadas por el sistema de monitoreo internacional), y los países que ya firmaron el tratado, pero están pendientes de su ratificación son: China, Egipto, Estados Unidos, Irán e Israel. Honduras firmó el tratado en septiembre de 1996, y este fue posteriormente ratificado en el 2003.

La organización asegura el monitoreo con el uso de tres métodos/herramientas. El uso del IMS (sistema internacional de vigilancia, mostrado en la (Bittner, n.d.) **Figura 1**), los IDC (centros internacionales de datos) y las inspecciones in situ.

El sistema internacional de vigilancia (o IMS por sus siglas en ingles) es una red de estaciones ubicadas en los distintos países que pertenecen al tratado. La red, hoy en día, consiste de 337 estaciones las cuales se distribuyen en estaciones sísmicas primarias y secundarias (tanto estaciones de tres componentes como arreglos sísmicos), estaciones hidroacústicas, estaciones de infrasonido, estaciones y laboratorios de radionúclidos.

Los datos recopilados por las estaciones son posteriormente enviados a los centros internacionales de datos (IDC) y posteriormente enviados al IDC de Viena para ser procesados y analizados. El proceso de selección de los posibles eventos de interés pasa por una selección automática hecha por un software interactivo, posteriormente un grupo de expertos se dedica a analizar los datos que fueron descartados por si el sistema automático obvió algunos eventos de interés, así mismo se analizan los eventos que pasaron el filtro automático por si algún evento del cual no tienen interés paso por el sistema. Una vez que todos los datos han sido debidamente procesados, los datos de los posibles eventos pueden ser descargados por los centros de datos nacionales (NDC) de cada nación perteneciente al tratado para que cada nación determine por si misma si el evento es o no una prueba nuclear.

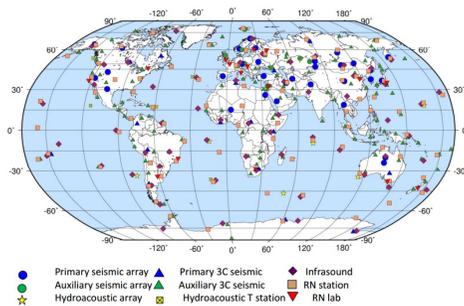


Figure 1: Estaciones de la IMS, Bittner, 2017

Los datos recopilados por la IMS pueden ser descargados por los usuarios de los NDC (o por un instituto científico interesado haciendo una petición formal) no solo con el propósito de la determinación de una prueba nuclear, estos datos también pueden ser usados para propósitos científicos como estudios de la estructura interna de la Tierra, gestión de riesgos, procesos oceánicos, etc.

A continuación daremos a conocer algunos conceptos básicos de sismología, al igual como algunas técnicas que pueden ser utilizadas para analizar los datos que se pueden obtener de los IDC y determinar la naturaleza de eventos sísmicos.

I CONCEPTOS

Hay distintos criterios que se pueden tomar al momento de determinar si un evento captado en un sismograma es o no una explosión. El algoritmo que se va a seguir en los ejemplos que se resolverán mas adelante sera el siguiente.

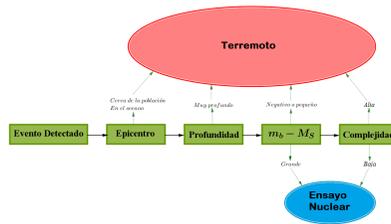


Figure 2: Proceso seguido para discernir un evento

A continuación tenemos una breve reseña de los conceptos utilizados en el proceso.

I Hipocentro

La localización del hipocentro es un problema de inversión en el cual tratamos de encontrar parámetros de latitud, longitud, profundidad y tiempo de origen de un evento sísmico a partir de los datos observados de tiempo de llegada a las estaciones sísmicas. Para entender la naturaleza del problema, se necesita conocer la relación entre los tiempos de llegada y la localización de hipocentro. (Inoue, n.d.)

En el caso de estudio utilizado por la IMS, las ondas analizadas son telesísmicas (ondas que han viajado una distancia mayor a 100km). Los tiempos de llegada de estas ondas han sido analizadas por varios años, estos estudios han sido revisados constantes veces mejorando el modelo de velocidades y las localizaciones de hipocentros hasta que en los 1950 se estableció una estructura terrestre y tabla de tiempos de viaje estándar.

Hay distintos métodos para ubicar un epicentro (o hipocentro) que utilizan las tablas de tiempo de viajes entre ellos existen los métodos manuales como el uso del coeficiente de Omori y los diagramas de Wadati, que son buenos métodos para dar una estimación del origen del sismo. También existen métodos iterativos que podemos utilizar como el método iterativo de Geiger. En nuestro caso, utilizaremos el método de búsqueda en cuadrícula (grid search method o GSM).

Los métodos convencionales intentan lineal izar la fórmula para el hipocentro:

$$T_i = \int_{\Gamma(x,y,z,t)} \frac{1}{V_p} ds \tag{1}$$

Donde (x,y,z,t) son los parámetros del hipocentro, T_i son los tiempos de llegada para el i -ésimo dato. Γ es el camino del rayo a lo largo del cual integramos la lentitud (slowness $1/V$).

Sin embargo el GSM toma otro enfoque, se calcula el tiempo de viaje (1) de todas las estaciones para varias localizaciones de hipocentro de prueba (distribuidas en forma de cuadrícula) y se compara con los datos recopilados para calcular la diferencia y se decide la solución que tenga la suma cuadrática de residuos mínima. En el caso que el residuo sea demasiado alto se puede tomar la solución obtenida y refinar mas la cuadrícula en la zona de dicha solución.

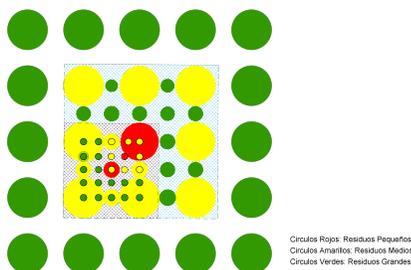


Figure 3: Representación gráfica de GSM, tras tres iteraciones.

GSM es un método simple al compararlo con otros métodos de inversión, la mayoría de las computadoras de hoy pueden hacer el cálculo usando cuadrículas con distancias pequeñas (intervalos de 1km en escala global) por lo cual es muy raro que se necesiten varias iteraciones a diferencia de los otros métodos iterativos. Los únicos parámetros que se necesitan son los tiempos de llegada y las coordenadas de las estaciones.

El criterio que usamos para determinar si el evento es una explosión o un terremoto, es que si el epicentro (localización sin profundidad) es cercano a una ciudad o en un océano el evento es un terremoto. Por otra parte, si el evento está localizado en una zona continental poco aislada de la sociedad no podemos determinar si este es o no un terremoto solo con esta información por lo que se acude a la profundidad. Si el evento es profundo es definitivamente un terremoto dado que no el ser humano no puede excavar distancias muy grandes, y por ello no podría ser una explosión. Sin embargo, el parámetro de profundidad usualmente tiene un alto error por lo cual utilizamos más criterios para discernir con mayor confiabilidad.

El programa que se utilizara más adelante fue desarrollado por Furutade, de Matsushiro JMA y posteriormente modificado por Yoshida de MRI. El programa usa intervalos de 1km en longitud, latitud, y profundidad, y de 0.1 segundos para el tiempo de origen tras su última iteración (comenzando con intervalos de 5 grados x 5 grados x 1 km x 60 segundos, pasando por 18 iteraciones). Las fases que utiliza son la primer P que se detecta en el sismograma.

1 Diferencia Entre Magnitudes de Ondas Superficiales y de Cuerpo

(Katsumata, n.d.) Hay distintos tipos de magnitudes dependiendo del tipo de instrumento que se esta utilizando, en nuestro caso nos interesan la magnitud de las ondas de cuerpo (m_b) que detectamos con sismómetros de periodo corto y la magnitud de las ondas superficiales que detectamos con instrumentos de periodo largo.

Para calcular la magnitud de las ondas de cuerpo utilizamos la fórmula de Gutenberg:

$$m_B = \log_{10}(A/T) + q(\Delta, h) \tag{2}$$

En donde A es la amplitud máxima alcanzada por la onda P en los primeros instantes de la llegada del sismo en micrómetros, T es el periodo de la señal en segundos y $q(\Delta, h)$ es la función de calibración ((Katsumata, n.d.) **Figura 4**) para corregir el decaimiento de la amplitud dada una distancia y profundidad.

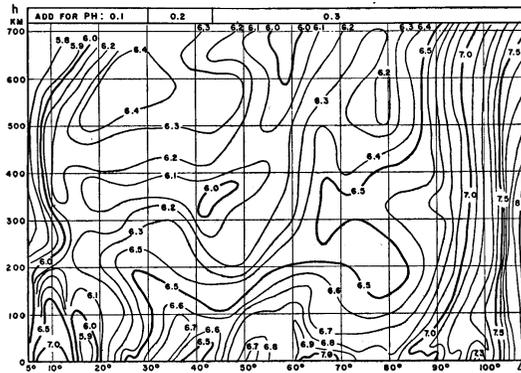


Figure 4: Función de calibración $q(\Delta, h)$, Guttenberg y Richter.

Para las ondas superficiales utilizamos la siguiente fórmula (Vanek et al. (1962)):

$$M_S = \log_{10}(A/T) + 1.66\log_{10}\Delta + 3.3 \tag{3}$$

Donde de nuevo A es la amplitud máxima en micrómetros, pero en este caso de las ondas superficiales, T es el periodo de la señal y Δ es la distancia epicentral en grados. Estos parámetros aparecen en la (Y. Yoshida, n.d.-b) **Figura 5**.

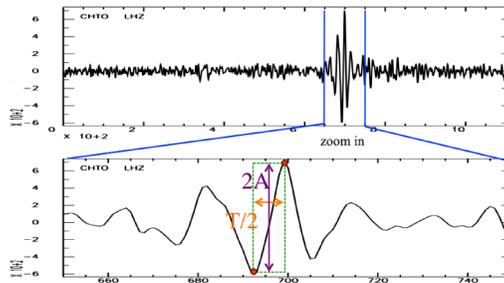


Figure 5: Ejemplo de amplitud y periodo. Yoshida y Otsu 2017.

La técnica para discernir en este caso la hacemos simplemente al restar dichas magnitudes. Debido a la naturaleza de las explosiones, y el hecho que tienen un patrón de radiación igual en todas direcciones, la magnitud de ondas de cuerpo es notablemente mayor que la magnitud de ondas superficiales. Esto se puede ver claramente en la (Katsumata, n.d.) **Figura 6**.

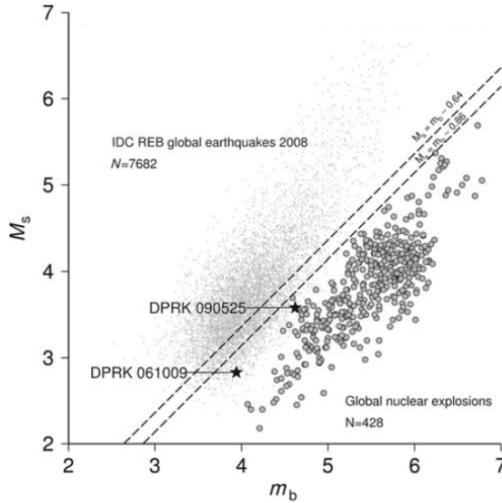


Figure 6: Relación entre m_B y M_S . Selby et al. (2012) BSSA

En la (Katsumata, n.d.) **Figura 6** se gráficán las explosiones nucleares que han sido detectadas. Como podemos observar, las explosiones se encuentran por debajo de una pendiente de 1 (en donde las magnitudes serían iguales, lo que nos muestra que para las explosiones $m_B > M_S$). En la gráfica además se muestran dos rectas propuestas para indicar el límite entre explosión y terremoto.

Otra imagen que nos demuestra la siguiente en la cual se gráficán tanto explosiones como terremotos (notar que en la siguiente gráfica los ejes están cambiados) se muestra en la (Katsumata, n.d.) **Figura 7**. Las estrellas representan explosiones y los círculos representan terremotos.

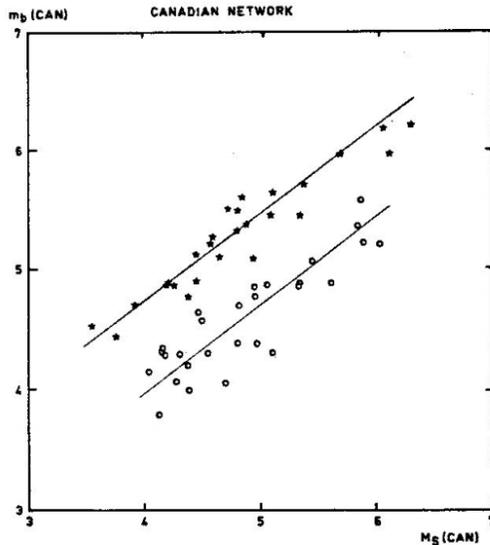


Figure 7: Relación entre m_B y M_S . Explosiones y Terremotos.

El método descrito anteriormente es muy eficiente pero lastimosamente no siempre es aplicable ya que es necesario tener buenas señales para poder determinar bien la magnitud. Además, necesitamos captar la señal en ambos tipos de instrumentos para poder aplicarlo.

Cabe mencionar que si para que el evento sea considerado una explosión nuclear el evento debe de ser grande (magnitudes grandes), los criterios siempre aplican para cualquier tipo de explosión (explosiones en minas, o cualquier otro tipo de bombas) por lo cual estos criterios pueden servir para depurar catálogos sísmicos.

1 Análisis de Sismogramas de Periodo Corto

(Y. Yoshida, n.d.-a) En el caso que las señales sean muy ruidosas, o que solo tengamos sismogramas de periodo corto podemos usar tres técnicas más para intentar discernir si el evento es un terremoto o una explosión. Estas técnicas tienen un alto grado de aplicabilidad pero no tienen el mismo nivel de eficiencia que la comparación de magnitudes se menciona en la sección anterior.

Para los ejemplos que se mostrarán al final, hicimos uso del método de la complejidad (C) del sismograma, pero también existen mas criterios como estudiar la relación espectral (SR) o el tercer momento de frecuencia (TMF).

1 Complejidad (C)

La complejidad del sismograma es una buena manera para determinar la naturaleza del evento. Usualmente la forma de onda de una explosión es impulsiva (tenemos un pico grande inicial, que decae rápidamente), mientras que los terremotos tienen una coda larga que tarda en decaer. Esto se puede ver claramente en la siguiente imagen en la cual mostramos dos sismogramas distintos en los cuales se puede ver claramente el comportamiento descrito anteriormente (sin la necesidad de aplicar ningún tipo de filtro).

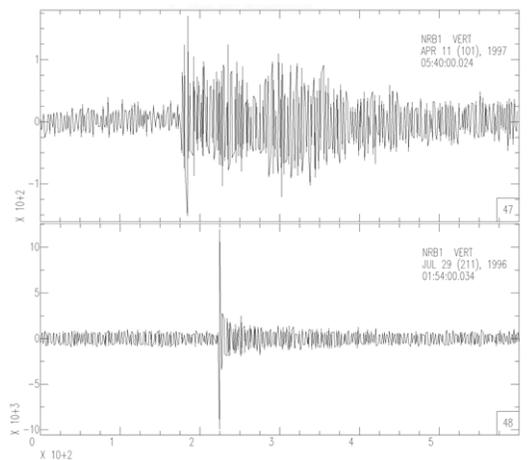


Figure 8: Sismogramas de periodo corto de un terremoto (superior) y una explosión nuclear (inferior)

Para poder utilizarlo como método para discernir no basta con observar los sismogramas, la manera como cuantificamos dicho proceso es:

$$C = \frac{\int_{t_1}^{t_2} s^2(t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} s^2(t) dt} \quad (4)$$

Siendo t_0 usualmente el tiempo de llegada, y de tal modo que $t_1 - t_0$ sea aproximadamente dos a cinco segundos, representándola el inicio del evento y $t_2 - t_1$ sea aproximadamente veinticinco a treinta segundos representando la coda.

Por lo tanto, los valores de complejidad altos los determinamos terremotos y los valores bajos de complejidad baja serán tomados como explosiones nucleares.

I Relación Espectral (SR) y Tercer Momento de Frecuencia (TMF)

En el caso de la relación espectral (obtenido al aplicarle la transformada de Fourier a los datos) se puede observar que las frecuencias altas dominan debido a que la duración de la fuente es muy corta. En el caso de las explosiones, mientras que en los terremotos lo son frecuencias un poco más bajas.

Para su cálculo se utiliza la siguiente fórmula:

$$SR = \frac{\int_{h_1}^{h_2} A(f) df}{\int_{l_1}^{l_2} A(f) df} \quad (5)$$

Donde h_1 y h_2 son las frecuencias altas, l_1 y l_2 son las frecuencias bajas.

El mismo hecho (que las explosiones nucleares contienen elementos con frecuencias más altas) se puede utilizar al calcular el TMF (Tercer Momento de Frecuencia).

$$TMF = \frac{\int_0^{f_0} f^3 A(f) df}{\int_0^{f_0} A(f) df} \quad (6)$$

Donde f_0 es un límite de frecuencia superior elegido. Estos dos métodos son limitados dado que tenemos que seleccionar un buen valor para las frecuencias para que estos sean efectivos. En ambos casos, un valor alto de SR o TMF nos indicarían que el evento es una explosión nuclear y un valor bajo que es un terremoto.

I Otros Métodos

Los métodos expuestos anteriormente solo son algunos de los posibles pero también es posible utilizar los siguientes, pero únicamente en eventos grandes:

- Polaridad del movimiento inicial
- Inversión de la forma de onda
- Frecuencia de corte
- Relación P/S regional
- Análisis de Ondas P en sismogramas de banda ancha
- Ondas de Love
- Análisis de Ondas S

Para obtener el mejor criterio posible, lo recomendable es combinar los diferentes métodos mencionados.

I EJEMPLOS

A continuación se muestra el análisis de cuatro eventos, usaremos el procedimiento que se describe en la figura 1, con el fin de concluir cual es la naturaleza del evento. Para el utilizamos datos conseguidos de estaciones del NEIC (National Earthquake Information Center). (Y. Yoshida, n.d.-b)

El primer paso es encontrar el hipocentro del evento, como se menciona anteriormente utilizaremos el programa GSM. Para ello debemos preparar un documento de texto .phase en el siguiente formato.

```
1997/04/11 5:39:24.27 56.4302 58.5625 ARU
1997/04/11 5:39:51.11 47.8652 107.0528 ULN
1997/04/11 5:40:38.887 18.4205 98.9588 CM01
1997/04/11 5:40:53.639 40.0183 116.1679 BJT
1997/04/11 5:42:56.759 60.7382 11.5427 NRB1
1997/04/11 5:42:47.657 34.5322 132.6775 SHK
1997/04/11 5:45:7.17 5.1761 18.4242 BGCA
1997/04/11 5:46:49.658 6.6701 -4.8563 DBIC
1997/04/11 5:46:40.59 62.4024 -114.6054 YKB1
```

Figure 9: Documento de texto utilizado para compilar GSM.

El documento incluye cinco columnas: Fecha, tiempo de llegada, latitud, longitud, código de la estación. Tras ejecutar el programa, este nos da dos soluciones una que mantiene la profundidad en 30 km y la otra que tiene libertad de cambiar la profundidad. El software utilizado para graficar y leer los tiempos de llegada de las ondas fue SAC (Seismic Analysis Code).

Los resultados que obtuvimos son los siguientes:

```
[migue@earth gsm]$ gsm event1.phase
read time(sec) = 0.35
Hypocenter      yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss  lat.    long.  dep.  rms
depth(30km) : 1997/04/11 05:34:46.5000  39.61   76.84  30.0  0.13
Hypocenter      yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss  lat.    long.  dep.  rms
depth(free) : 1997/04/11 05:34:45.0500  39.61   76.85  19.0  0.15
calc time(sec) = 0.26
[migue@earth gsm]$ cat event1.phase.out
Hypocenter      yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss  lat.    long.  dep.  rms
depth(30km) : 1997/04/11 05:34:46.5000  39.61   76.84  30.0  0.13
N code          yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss  dist.   tr.time  O-C
1 ARU           1997/04/11 05:39:23.9380    20.69   277.44   -0.13
2 ULN           1997/04/11 05:39:51.0910    23.22   304.59    0.01
3 CM01          1997/04/11 05:40:38.8870    28.49   352.39   -0.12
4 BJT           1997/04/11 05:40:52.7650    30.04   366.27    0.02
5 NRB1          1997/04/11 05:42:56.0900    44.63   489.59    0.06
6 SHK           1997/04/11 05:42:53.2400    44.24   486.74    0.33
7 BGCA          1997/04/11 05:45:08.2720    62.62   621.77    0.35
8 DBIC          1997/04/11 05:46:49.6580    79.39   723.16   -0.00
9 YKB1          1997/04/11 05:46:41.3440    77.91   714.84   -0.17
Hypocenter      yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss  lat.    long.  dep.  rms
depth(free) : 1997/04/11 05:34:45.0500  39.61   76.85  19.0  0.15
N code          yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss  dist.   tr.time  O-C
1 ARU           1997/04/11 05:39:23.9380    20.69   278.89   -0.01
2 ULN           1997/04/11 05:39:51.0910    23.22   306.04    0.11
3 CM01          1997/04/11 05:40:38.8870    28.49   353.84   -0.13
4 BJT           1997/04/11 05:40:52.7650    30.04   367.71   -0.01
5 NRB1          1997/04/11 05:42:56.0900    44.63   491.04   -0.01
6 SHK           1997/04/11 05:42:53.2400    44.23   488.19    0.34
7 BGCA          1997/04/11 05:45:08.2720    62.63   623.22    0.16
8 DBIC          1997/04/11 05:46:49.6580    76.40   724.61   -0.22
9 YKB1          1997/04/11 05:46:41.3440    77.91   716.29   -0.34
```

Figure 10: Salida del programa GSM

Las coordenadas del evento cuando se deja libre la variable de profundidad son:

Latitud= 39.61
 Longitud= 76.85
 Profundidad=19km

A pesar de tener una profundidad mayor a cinco kilómetros, no haremos descartes por profundidad ya que está variable tenía un error muy grande en la mayoría de mediciones.

Al buscar el resultado en un mapa la localización fue:

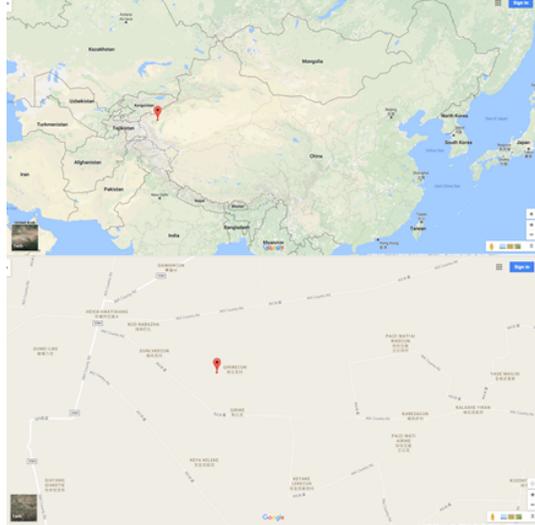


Figure 11: Localización del primer evento

Es fácil concluir que este evento es un terremoto dado que su localización es cercana a una zona muy poblada lo cual haría muy evidente una prueba nuclear.

Siguiendo con el procedimiento, se toma los sismogramas de periodo corto para calcular las magnitudes de las ondas de cuerpo utilizando la ecuación (2) y se analizan las señales de periodo largo para calcular la magnitud de ondas superficiales. Tomamos un promedio y luego tomamos un promedio de ellas.

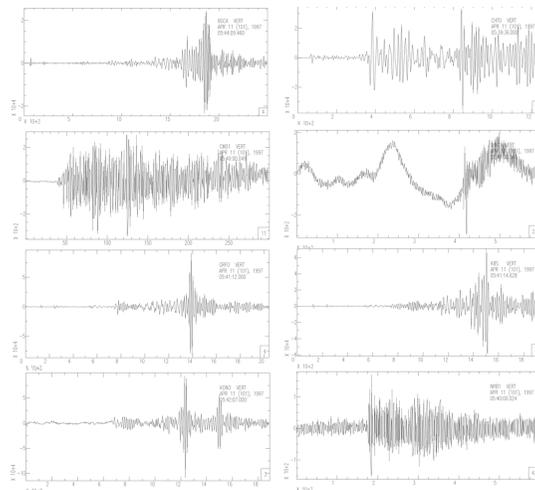


Figure 12: Formas de onda utilizadas para localizar el evento

| No. | Código | Δ | Superior (nm) | Inferior (nm) | Amplitud (μm) |
|-----|--------|----------|---------------|---------------|----------------------|
| 1 | CM01 | 28 | 163.74 | -218.53 | 0.18 |
| 2 | DBIC | 80 | 62.49 | -293.32 | 0.18 |
| 3 | NRB1 | 45 | 169.54 | -149.32 | 0.16 |
| 4 | YKB1 | 78 | 94.50 | -221.71 | 0.16 |

| No. | Código | $t_1(s)$ | $t_2(s)$ | T (s) | $q(\Delta, h)$ | m_B |
|-----|--------|----------|----------|-------|----------------|-------|
| 1 | CM01 | 54.77 | 55.32 | 1.11 | 6.5 | 5.7 |
| 2 | DBIC | 58.37 | 59.25 | 1.77 | 6.8 | 5.8 |
| 3 | NRB1 | 4.48 | 4.87 | 0.77 | 6.7 | 6.0 |
| 4 | YKB1 | 49.49 | 50.35 | 1.74 | 6.8 | 5.8 |

Table 1: Resultados para los cálculos de m_B

| No. | Código | Δ | Superior (nm) | Inferior (n) | Amplitud (μm) |
|-----|--------|----------|---------------|--------------|----------------------|
| 1 | BGCA | 63 | 24036.30 | -21554.50 | 22.80 |
| 2 | CHTO | 28 | 33137.40 | -35657.40 | 34.40 |
| 3 | GRFO | 60 | 90364.13 | -80776.90 | 85.57 |
| 4 | KBS | 51 | 67778.40 | -57931.60 | 62.86 |
| 5 | KONO | 46 | 94110.50 | -109278.00 | 101.69 |

| No. | Código | $t_1(s)$ | $t_2(s)$ | T (s) | M_S |
|-----|--------|----------|----------|-------|-------|
| 1 | BGCA | 21.44 | 28.48 | 14.09 | 6.5 |
| 2 | CHTO | 36.97 | 42.97 | 11.99 | 6.2 |
| 3 | GRFO | 20.97 | 27.10 | 12.27 | 7.1 |
| 4 | KBS | 19.57 | 25.66 | 12.18 | 6.8 |
| 5 | KONO | 37.08 | 43.16 | 12.16 | 7.0 |

Table 2: Resultados para los cálculos de M_S

Tras analizar las formas de onda, encontrar sus amplitudes, periodos, y magnitudes procedemos a encontrar el promedio de las magnitudes que nos da como resultado:

$$\bar{m}_B = 5.9$$

$$\bar{M}_S = 6.6$$

Para determinar que tipo de evento fue ocupamos hacer la resta de las magnitudes, en nuestro primer evento el resultado es:

$$m_B - M_S = -0.7$$

El criterio dice que si la resta de las magnitudes es negativa o muy pequeña, el evento se descarta como un terremoto, tal como se había predicho anteriormente.

El último criterio es el cálculo de la complejidad de la onda. Para ello utilizamos el programa *c*, para el cual se debe preparar un archivo de entrada *c.par* que contiene la lista de parámetros de la señal como: Intervalo de muestreo, año, día del año, tiempo de llegada (en formato de hora, minutos, segundos, milisegundos). Luego se especifica en línea de comando la estación para la cual se está calculando la complejidad.

```

1 0.05 : ich , dt(sec)
5.000 30.000 : itime1(sec),itime2(sec)
1997 101 5 48 40 752 : arrival time of P-wave

```

Figure 13: Archivo de parámetros para el programa *c*

Al hacer el cálculo para cada una de las estaciones de periodo corto que detectaron la señal, la complejidad de las mismas es la siguiente:

| No. | Código | Complejidad |
|-----|--------|-------------|
| 1 | CM01 | 272.27 |
| 2 | DBIC | 3.49 |
| 3 | NRB1 | 2.06 |
| 4 | YKB1 | 5.29 |

Table 3: Complejidad de las formas de onda

Como podemos observar, cada una de ellas tiene un valor mayor a uno, la razón por la cual no todos los valores de complejidad son altos como los de la estación CM01 puede ser debido a efectos de atenuación de la onda. Sin embargo estos valores de complejidad también nos indican que el evento es un terremoto.

Luego de aplicar cada uno de los criterios que utilizamos en estos ejemplos, todos nos indican que el evento en efecto es un terremoto, por lo cual se puede concluir esto sin dar lugar a duda alguna.

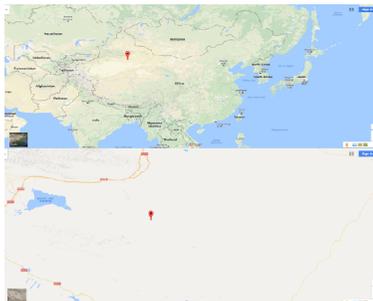
El procedimiento que utilizamos para este evento se repite para cada uno de los siguientes eventos. La única excepción es el tercer evento ya que no tenemos registros en estaciones sísmicas con instrumentos de periodo largo.

No todas las señales captadas fueron igual de limpias como las del evento anterior, en algunos casos fue necesario aplicar filtros pasa alta para eliminar señales exteriores a las del evento y de esta manera lograr determinar las fases con más facilidad.

A continuación el resumen de los resultados de los otros eventos.

Cálculos para el evento 2

```
[migue@earth gsm]$ gsm event2_phase
read time(sec) = 0.34
Hypocenter: 1996/06/08 02:56:04.0000 lat. long. dep. rms
depth(30km): 41.71 88.69 30.0 0.10
Hypocenter: 1996/06/08 02:56:02.6000 lat. long. dep. rms
depth(Free): 41.71 88.71 20.0 0.07
calc time(sec) = 0.22
[migue@earth gsm]$ cat event2_phase.out
Hypocenter: 1996/06/08 02:56:04.0000 lat. long. dep. rms
depth(30km): 41.71 88.71 20.0 0.10
N code yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss dist. tr.time 0-C
1 BGCA 1996/06/08 03:07:24.0000 71.87 680.00 -0.09
2 CM01 1996/06/08 03:01:23.3530 24.81 319.35 -0.02
3 DBIC 1996/06/08 03:08:52.5040 88.25 768.50 0.18
4 LOR 1996/06/08 03:05:53.1220 57.91 590.12 -0.03
5 NPO 1996/06/08 03:06:43.0770 65.33 639.08 -0.17
6 NRB1 1996/06/08 03:04:46.1280 48.77 522.13 0.18
7 YKB1 1996/06/08 03:07:39.9750 74.56 695.97 -0.01
Hypocenter: 1996/06/08 02:56:02.6000 lat. long. dep. rms
depth(Free): 41.71 88.71 20.0 0.07
N code yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss dist. tr.time 0-C
1 BGCA 1996/06/08 03:07:24.0000 71.88 681.40 -0.18
2 CM01 1996/06/08 03:01:23.3530 24.82 320.75 -0.01
3 DBIC 1996/06/08 03:08:52.5040 88.27 769.90 0.01
4 LOR 1996/06/08 03:05:53.1220 57.91 590.62 -0.03
5 NPO 1996/06/08 03:06:43.0770 65.31 640.48 -0.06
6 NRB1 1996/06/08 03:04:46.1280 48.77 523.53 0.21
7 YKB1 1996/06/08 03:07:39.9750 74.55 697.37 0.00
```



(a) Salida del programa GSM

(b) Localización del evento

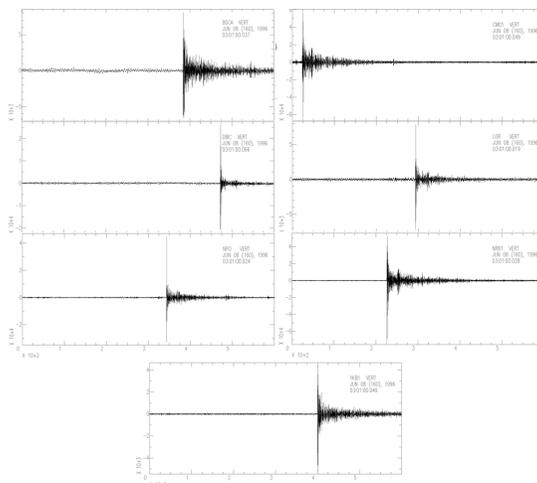


Figure 15: Formas de onda utilizadas para localizar el evento

| No. | Código | Δ | Superior (nm) | Inferior (nm) | Amplitud μm |
|-----|--------|----------|---------------|---------------|------------------------|
| 1 | BGCA | 72 | 75.90 | -73.99 | 0.07 |
| 2 | CM01 | 28 | 281.96 | -19.33 | 0.15 |
| 3 | DBIC | 80 | 188.15 | -129.96 | 0.16 |
| 4 | LOR | 58 | 113.95 | -86.52 | 0.10 |
| 5 | LOR | 75 | 63.56 | -75.72 | 0.07 |
| 6 | NRB1 | 45 | 276.66 | -297.84 | 0.29 |
| 7 | NPO | 65 | 29.75 | -33.22 | 0.03 |

| No. | Código | t_1 (s) | t_2 (s) | T (s) | $q(\Delta, h)$ | m_B |
|-----|--------|-----------|-----------|-------|----------------|-------|
| 1 | BGCA | 24.98 | 25.26 | 0.56 | 6.9 | 6.0 |
| 2 | CM01 | 25.37 | 25.76 | 0.77 | 6.5 | 5.8 |
| 3 | DBIC | 53.40 | 53.72 | 0.66 | 6.8 | 6.2 |
| 4 | LOR | 53.78 | 54.06 | 0.55 | 6.9 | 6.2 |
| 5 | LOR | 40.64 | 41.15 | 1.03 | 6.9 | 5.7 |
| 6 | NRB1 | 47.05 | 47.36 | 0.61 | 6.7 | 6.4 |
| 7 | NPO | 43.79 | 44.13 | 0.66 | 7 | 5.7 |

Table 4: Resultados para los cálculos de m_B

| No. | Código | Δ | Superior (nm) | Inferior (nm) | Amplitud (μm) | t_1 (s) | t_2 (s) | T (s) | M_S |
|-----|--------|----------|---------------|---------------|----------------------|-----------|-----------|-------|-------|
| 1 | CHTO | 28 | 697.92 | -590.82 | 0.64 | 46.46 | 52.99 | 13.07 | 4.4 |
| 2 | KBS | 51 | 382.61 | -309.05 | 0.35 | 26.66 | 31.13 | 8.93 | 4.7 |
| 3 | KONO | 46 | 354.74 | -299.80 | 0.33 | 20.16 | 29.06 | 17.81 | 4.3 |
| 4 | TATO | 32 | 675.83 | -675.75 | 0.68 | 958.68 | 963.67 | 10.00 | 4.6 |
| 5 | YSS | 38 | 508.64 | -581.26 | 0.54 | 14.91 | 22.05 | 14.27 | 4.5 |

Table 5: Resultados para los cálculos de M_S

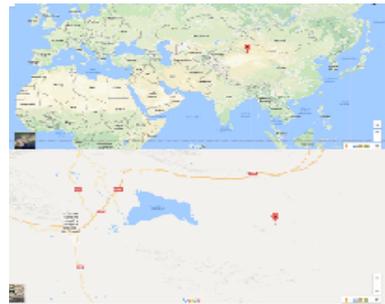
| No. | Código | Complejidad |
|-----|--------|-------------|
| 1 | BGCA | 7.38 |
| 2 | NRB1 | 0.59 |
| 3 | DBIC | 0.09 |
| 4 | LOR | 0.28 |
| 5 | NPO | 0.19 |
| 6 | NRB1 | 0.31 |
| 7 | YKB1 | 0.37 |

Table 6: Complejidad de las formas de onda

Cálculos para el evento 3

```
[miguel@earth gsm]$ gsm event3.phase
read time(sec) = 0.34
hypocenter      yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss  lat.    long.  dep.  rms
depth(30km) : 1996/07/29 01:49:04.2000  41.85   88.18  30.0  0.08
hypocenter      yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss  lat.    long.  dep.  rms
depth(Free) : 1996/07/29 01:49:06.9000  41.82   88.18  54.0  0.04
calc time(sec) = 0.13
[miguel@earth gsm]$ cat event3.phase.out
hypocenter      yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss  lat.    long.  dep.  rms
depth(30km) : 1996/07/29 01:49:04.2000  41.85   88.18  30.0  0.08
N code  yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss  dist.  tr.time  O-C
1  BGCA  1996/07/29 02:00:22.0000  71.52  677.80  -0.19
2  CMO1  1996/07/29 01:54:26.1940  25.10  221.99  -0.01
3  NRB1  1996/07/29 01:57:43.5120  48.42  519.31  0.05
4  YKB1  1996/07/29 02:00:39.7140  74.49  695.51  -0.06
hypocenter      yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss  lat.    long.  dep.  rms
depth(Free) : 1996/07/29 01:49:06.9000  41.82   88.18  54.0  0.04
N code  yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss  dist.  tr.time  O-C
1  BGCA  1996/07/29 02:00:22.0000  71.51  675.10  0.02
2  CMO1  1996/07/29 01:54:26.1940  25.07  219.79  -0.02
3  NRB1  1996/07/29 01:57:43.5120  48.43  516.61  -0.08
4  YKB1  1996/07/29 02:00:39.7140  74.52  692.81  -0.07
[miguel@earth gsm]$
```

(a) Salida del programa GSM



(b) Localización del evento

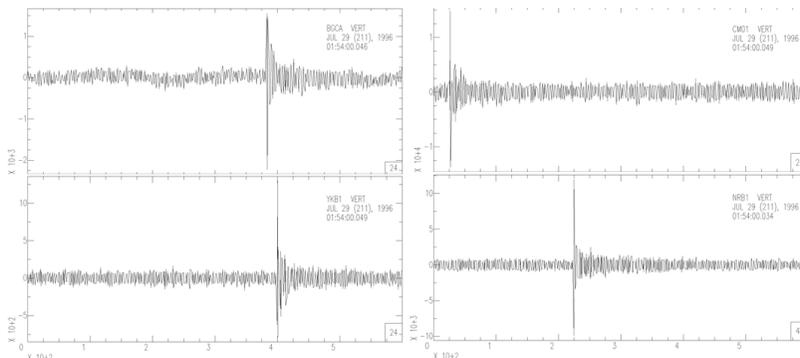


Figure 17: Formas de onda utilizadas para localizar el evento

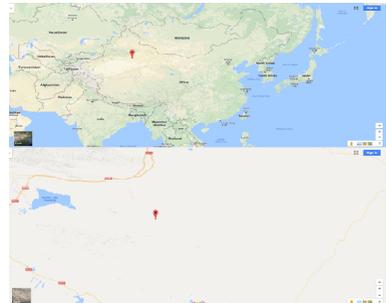
| No. | Código | Complejidad |
|-----|--------|-------------|
| 1 | BGCA | 0.53 |
| 2 | CM01 | 0.43 |
| 3 | NRB1 | 0.31 |
| 4 | YKB1 | 0.61 |

Table 7: Complejidad de las formas de onda

Cálculos para el evento 4

```
[miguel@earth gsm]$ gsm event2.phase
read time(sec) = 0.34
hypocenter yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss lat. long. dep. rms
depth(30km) : 1996/06/08 02:56:04.0000 41.71 88.69 30.0 0.10
hypocenter yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss lat. long. dep. rms
depth(Free) : 1996/06/08 02:56:02.6000 41.71 88.71 20.0 0.07
calc time(sec) = 0.22
[miguel@earth gsm]$ cat event2.phase.out
hypocenter yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss lat. long. dep. rms
depth(30km) : 1996/06/08 02:56:04.0000 41.71 88.69 30.0 0.10
N code yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss dist. tr. time O-C
1 BGCA 1996/06/08 03:07:24.0000 71.87 680.00 -0.05
2 CM01 1996/06/08 03:01:23.3530 24.81 319.35 -0.02
3 DSIC 1996/06/08 03:08:52.5040 88.25 768.50 0.18
4 LOR 1996/06/08 03:05:53.1220 57.91 589.12 -0.03
5 NPD 1996/06/08 03:06:43.0770 65.33 639.08 -0.17
6 NRB1 1996/06/08 03:04:46.1260 49.77 522.13 0.18
7 YKB1 1996/06/08 03:07:39.9750 74.56 695.97 -0.01
hypocenter yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss lat. long. dep. rms
depth(Free) : 1996/06/08 02:56:02.6000 41.71 88.71 20.0 0.07
N code yyyy/mm/dd hh:mm:ss.ssss dist. tr. time O-C
1 BGCA 1996/06/08 03:07:24.0000 71.88 681.40 -0.19
2 CM01 1996/06/08 03:01:23.3530 24.82 320.75 -0.01
3 DSIC 1996/06/08 03:08:52.5040 88.27 769.80 0.01
4 LOR 1996/06/08 03:05:53.1220 57.91 590.52 -0.03
5 NPD 1996/06/08 03:06:43.0770 65.31 640.48 -0.06
6 NRB1 1996/06/08 03:04:46.1260 49.77 522.53 0.21
7 YKB1 1996/06/08 03:07:39.9750 74.55 697.37 0.00
```

(a) Salida del programa GSM



(b) Localización del evento

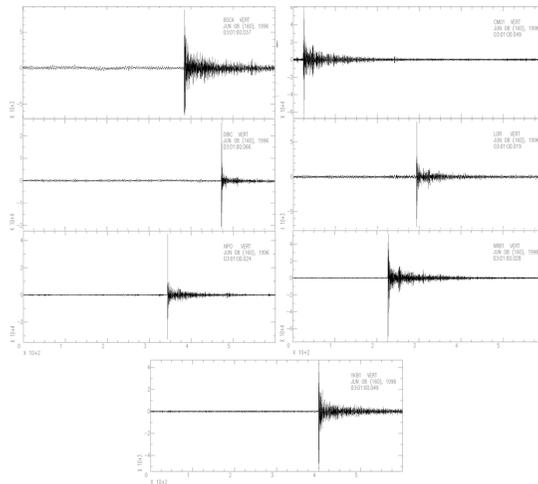


Figure 19: Formas de onda utilizadas para localizar el evento

| No. | Código | Δ | Superior (nm) | Inferior (nm) | Amplitud (μm) | t_1 (s) | t_2 (s) | T (s) | q(Δ ,h) | m_B |
|-----|--------|----------|---------------|---------------|----------------------------|-----------|-----------|-------|-----------------|-------|
| 1 | BGCA | 73 | 52.90 | -37.95 | 0.05 | 18.23 | 18.50 | 0.54 | 6.8 | 5.7 |
| 2 | DBIC | 87 | 40.01 | -40.20 | 0.04 | 35.39 | 36.10 | 1.41 | 7.0 | 5.5 |
| 3 | LOR | 54 | 67.09 | -69.49 | 0.07 | 11.18 | 11.61 | 0.86 | 6.8 | 5.7 |
| 4 | NPO | 59 | 104.01 | -131.06 | 0.12 | 50.91 | 51.47 | 1.12 | 6.8 | 5.8 |
| 5 | QIS | 83 | 72.49 | -72.71 | 0.07 | 13.64 | 14.62 | 1.97 | 6.9 | 5.5 |

Table 8: Resultados para los cálculos de m_B

| No. | Código | Δ | Superior (nm) | Inferior (nm) | Amplitud (μm) | t_1 (s) | t_2 (s) | T (s) | M_S |
|-----|--------|----------|---------------|---------------|----------------------------|-----------|-----------|-------|-------|
| 1 | CHTO | 28 | 2718.08 | -3140.86 | 2.93 | 22.04 | 27.33 | 10.58 | 5.1 |
| 2 | COL | 59 | 4769.03 | -4367.51 | 4.57 | 26.89 | 34.19 | 14.61 | 5.7 |
| 3 | GRFO | 48 | 2111.27 | -2246.54 | 2.18 | 42.91 | 48.93 | 12.03 | 5.3 |
| 4 | TATO | 35 | 7845.07 | -6173.49 | 7.01 | 34.72 | 41.50 | 13.58 | 5.6 |
| 5 | YSS | 36 | 9039.13 | -8560.36 | 8.80 | 15.37 | 23.12 | 15.50 | 5.6 |

Table 9: Resultados para los cálculos de M_S

| No. | Código | Complejidad |
|-----|--------|-------------|
| 1 | BGCA | 37.07 |
| 2 | DBIC | 56.26 |
| 3 | LOR | 15.59 |
| 4 | NPO | 8.52 |
| 5 | QIS | 8.38 |

Table 10: Complejidad de las formas de onda

I RESUMEN DE LOS RESULTADOS

A continuación una tabla resumen de los resultados obtenidos:

| Evento | $\bar{m}_B - \bar{M}_S$ | C_{max} | C_{min} | Conclusión |
|--------|-------------------------|-----------|-----------|-------------------|
| 1 | -0.7 | 272.26 | 2.06 | Terremoto |
| 2 | 1.5 | 7.38 | 0.09 | Explosión Nuclear |
| 3 | N.A. | 0.61 | 0.31 | Explosión Nuclear |
| 4 | 0.20 | 56.26 | 8.38 | Terremoto |

Table 11: Resumen

En cuanto a localización se refiere, el resto de los eventos (del segundo al cuarto) ocurren en lugares relativamente remotos por lo cual no se podían descartar como explosión a primera instancia, era necesario hacer las demás pruebas. No se tomó tan en cuenta la profundidad debido al alto grado de error que se tuvo, este se puede disminuir agregando más estaciones al análisis.

En el segundo y cuarto evento la diferencia de magnitudes es positiva sin embargo, la del segundo evento es mayor que uno. Si analizamos la complejidad de la onda, en el caso del segundo evento en una estación tenemos un 7.38, sin embargo todos los demás valores son menores a uno, por lo cual llegamos a la conclusión de la tabla. Mientras que para el cuarto evento podemos ver que la complejidad mínima fue de 8.38, lo cual puede despejar cualquier duda que ocasionara el valor de la diferencia de magnitudes.

En cuanto al tercer evento, no tuvimos señales de periodo largo, por lo cual no se pudo

aplicar el criterio de la diferencia de magnitudes. Pero el comportamiento claro de la complejidad de las ondas (cuyo valor máximo fue de 0.61) nos deja claro que el evento en efecto fue una explosión.

| CONCLUSIONES

Los métodos utilizados para discernir si un evento es natural o es una explosión nuclear, son efectivos. Dentro de los ejemplos que hemos desarrollado, ambos eventos que fueron catalogados como una prueba nuclear están bien documentados, lo cual da confianza en el algoritmo usado para discernir los eventos.

Debemos notar que este algoritmo no es único, para mejorar la calidad al momento de discernir un evento lo más recomendable es aplicar la mayor cantidad de criterios posibles para tener un nivel de seguridad óptimo. La aplicación de un algoritmo tan sencillo como este por parte de los países miembros del CTBTO, son una gran contribución de monitoreo contra los ensayos nucleares a nivel global. Algoritmos más complicados son explicados en el documento *IISEE Lecture Note on IDC Overview (Bittner, n.d.)*.

Estos métodos no solo aplican para explosiones nucleares, también pueden ser aplicados para discernir si un evento es natural o si es una explosión de menor magnitud, o cualquier ruido que pudo ser captado por nuestros sismómetros, la única diferencia serían las magnitudes del evento. Esto quiere decir que tiene más utilidades, como depurar un catálogo sísmico para tener mejor veracidad en la detección de eventos.

| REFERENCIAS

Bittner, P. (n.d.). Iisee lecture note on idc overview.

Inoue, H. (n.d.). Iisee lecture note on hypocenter location.

Katsumata, A. (n.d.). Iisee lecture note on discrimination by mb-ms.

Y. Yoshida, T. O. (n.d.-a). Iisee lecture note on discrimination by short period seismograms.

Y. Yoshida, T. O. (n.d.-b). Iisee lecture note on general discrimination technique.